



Universidade do Minho

# **Projeto e análise ao funcionamento de carros elétricos**

(Dissertação de Mestrado em Eng. Mecânica)

Por

**Joaquim Carlos Novais de Freitas (nºa52762)**

Realizado em:

Laboratório de motores térmicos e SMS-Soluções de Mobilidade Sustentável, Lda

Orientador: Jorge Martins

Coorientador: Francisco Brito

Departamento de Eng. Mecânica

Universidade do Minho

Guimarães, Setembro de 2012

## DECLARAÇÃO

Nome: Joaquim Carlos Novais de Freitas  
Endereço electrónico: a52762@alunos.uminho.pt  
Telefone: 962344946  
Número do Bilhete de Identidade: 10127329  
Título dissertação:

### **Projeto e análise ao funcionamento de carros elétricos**

Orientadores:

Jorge José Gomes Martins e Francisco Brito

Ano de conclusão: 2012

Designação do Mestrado ou do Ramo de Conhecimento do Doutoramento:

Dissertação de Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica

Declaro que concedo à Universidade do Minho e aos seus agentes uma licença não-exclusiva para arquivar e tornar acessível, nomeadamente através do seu repositório institucional, nas condições abaixo indicadas, a minha dissertação, no todo ou em parte, em suporte digital.

Declaro que autorizo a Universidade do Minho a arquivar mais de uma cópia da dissertação e a, sem alterar o seu conteúdo, converter a dissertação entregue, para qualquer formato de ficheiro, meio ou suporte, para efeitos de preservação e acesso.

Retenho todos os direitos de autor relativos à dissertação, e o direito de a usar em trabalhos futuros (como artigos ou livros).

Concordo que a minha dissertação seja colocada no repositório da Universidade do Minho com o seguinte estatuto: – Disponibilização imediata do conjunto do trabalho para acesso mundial;

Universidade do Minho, 05/07/2012

Assinatura: \_\_\_\_\_

## AGRADECIMENTOS

Agradece-se a todos que apoiaram ou que de alguma forma contribuíram para a concretização deste projeto, quer aos colegas do curso MIEMEC, quer aos colegas do departamento de electrónica.

Aos professores do departamento de Engenharia Mecânica da Universidade do Minho, em particular ao orientador, professor Dr. Jorge Martins, pela sua perspicácia e visão, que induziu à curiosidade e entusiasmo ao longo do projeto. Ao Dr. Francisco Brito, coorientador deste projeto, pela sua paciência.

No departamento de electrónica de potência, agradece-se às pessoas: Dr. Henrique Gonçalves, aos engenheiros Delfim Pedrosa e Vítor Monteiro pela paciência com que me esclareceram sobre os assuntos tratados.

Às pessoas do laboratório de automação e robótica: Dr. Gil Lopes, Dr. Fernando Ribeiro e todos colegas que estudam lá, pelas suas dicas e conselhos.

À Sónia pelo empréstimo do seu precioso *smartphone*, com o qual foi possível medir acelerações.

Ao engenheiro José Fecheira pela cedência do seu *dummie* (Tobias) usado no projeto.

Ao engenheiro Fabien, da empresa SMS, pelo apoio, empréstimo dos carros e por facultar dados relativamente aos seus componentes.



## RESUMO

No presente trabalho pretendeu-se fazer uma abordagem à mobilidade elétrica em vários campos, tanto teórico como numa perspectiva experimental e industrial. A análise teórica consistiu num estudo aprofundado ao estado da arte e na modelação de um veículo elétrico, incluindo a elaboração de um método para estimar o seu consumo e autonomia. A parte prática foi feita em colaboração com a empresa SMS (Fafe) e consistiu em dois trabalhos: a conversão de um “Buggy” de motorização a gasolina para motorização elétrica e a optimização dos parâmetros do controlador de um veículo real, o Little4.

No estudo ao estado da arte, contextualiza-se o tema e expõem-se questões que impedem a proliferação dos carros elétricos. Faz-se referência aos motores e aos sistemas de armazenamento de energia e órgãos de transmissão. Abordam-se os tipos de motores mais favoráveis à implementação em veículos elétricos. Faz-se referência ao motor síncrono de relutância comutada (SRM) que, embora não seja usado em veículos, mostra boa aptidão para esse efeito. Aborda-se também o conceito de motor na roda (in-wheel motor). São referidos sistemas de armazenamento de energia, baterias, ultracondensadores e células de combustível (Fuel Cell). Abordam-se também sistemas mecânicos de armazenamento de energia (menos convencionais, embora bastante difundidos na competição automóvel), como o volante de inércia, sistemas a ar comprimido e um sistema hidráulico.

É feita uma análise teórica (modelação) de um veículo elétrico (VE), na qual se inclui um estudo que refere o rendimento geral do carro elétrico, focando os órgãos onde existem maiores perdas. Elabora-se um método para obter um mapa de rendimento de um motor elétrico através de perdas já conhecidas em motores elétricos. É concebido um algoritmo em Matlab, através das forças dinâmicas que atuam num veículo, para estimar o seu consumo e autonomia. É desenvolvido um método em Matlab Simulink para simular a velocidade e aceleração de um VE para terrenos de diferentes declives. Desenvolve-se o cálculo que permite dimensionar o motor e a bateria, conforme os requisitos do veículo.

No primeiro trabalho prático a empresa SMS forneceu um Buggy (com motor a combustão) no qual foi realizada a verificação da estrutura com vista a uma futura conversão para motorização elétrica. Nessa verificação foi detetada uma anomalia na direção e fez-se um estudo de forma a corrigi-la. Elaborou-se um desenho 3D da estrutura de forma a proceder ao atravancamento dos novos órgãos

necessários à referida conversão. Fez-se também o dimensionamento e simulação (em Inventor) dos suportes para o motor elétrico.

O segundo trabalho prático consiste na optimização dos parâmetros do controlador do motor de um veículo real, o Little4 (carro produzido pela SMS), por forma a reduzir o sobreaquecimento do motor. Através desses parâmetros procedeu-se ao ajuste das correntes máximas fornecidas ao motor, assente num compromisso entre o desempenho e o sobreaquecimento deste. Transferiu-se a travagem regenerativa do pedal do acelerador (no estado de repouso) para o pedal do travão. Suavizou-se a ação do acelerador, principalmente em marcha-atrás e procederam-se pequenos ajustes de configuração através da *datasheet* dos componentes do carro.

Na parte final deste trabalho são indicadas algumas sugestões para melhoria do Little4, após isso são tecidas as conclusões.

## **ABSTRACT**

The present work had the objective of approaching electric mobility in various fields, both theoretically, experimentally and on an industrial perspective. The theoretical analysis consisted on the study of the State of the Art, on the performance analysis of an electric vehicle, including the elaboration of a method for estimating its consumption and autonomy. In the practical component of the work, held in collaboration with the company SMS (Sustainable Mobility Solutions), two tasks were performed: the conversion project of a "Buggy", from gasoline to electric motorization and also the optimization of the controller operation in a real vehicle, the Little4.

This work highlighted and discussed the main advantages of electric mobility as well as the drawbacks that hinder the proliferation of electric cars. The main powertrain and energy storage systems as well as transmission components were analyzed and their merits as well as disadvantages were discussed. In particular, the main types of engines which are more easily implemented in electric vehicle were analyzed. A special reference is made to the switched reluctance motor (SRM). Although it is still not used in vehicles, the latest developments in this technology might make it especially suitable for that application. The promising concept of the in-wheel motor is also addressed, as well as the various energy storage systems such as batteries, ultra capacitors and fuel cells. Mechanical energy storage systems such as flywheels, compressed air and hydraulic systems are also covered. Although less conventional, they are being increasingly used in motorsports.

The theoretical component of the present work was focused on the analysis of the overall efficiency of the electric car, focusing on the areas where there are greater losses. Two main fields were explored. On one hand a method for estimating the performance map of an electric motor based on the various sources electromagnetic losses in electric motors. On the other hand, a model for estimating the consumption and autonomy of an electric vehicle was developed in Matlab. This model analyses the various forces that act on a vehicle. Using the two aforementioned models a submodel was also developed in Matlab Simulink to estimate the speed and acceleration of a VE for different terrain slopes. These calculations allowed determining the required motor power as well as battery power and capacity for prescribed driving requirements.

The first practical application of the work to real vehicles of the industrial partner SMS consisted on preparing the adaptation of a gasoline Buggy to electric motoring, including the inspection of the

suitability of the chassis and subsystems. Namely, several improvements were proposed for the steering system. A 3D drawing of the structure was elaborated in order to facilitate the assembly of the new components used for the conversion. There was also the dimensioning and simulation (using software INVENTOR) of the supports for the electric motor.

The second practical work consisted on the optimization of the parameters of the motor controller from SMS's model Little4. Some of the adjustments included the tuning of the current supplied to the motor so as to optimize performance while avoiding overheating. In order to improve driving smoothness the regenerative braking that being activated whenever the accelerator pedal was release was eliminated. Instead, the regeneration control was assigned to the brake pedal. Other modifications included the softening of the throttle action (mainly in reverse gear) and other minor adjustments to the default configuration of the components of the car.

Before the conclusions, some suggestions for improvement of the Little4 are made in the final part of this work.



# ÍNDICE

AGRADECIMENTOS .....	i
RESUMO .....	iii
ABSTRACT.....	v
ÍNDICE .....	vii
ABREVIATURAS .....	x
SÍMBOLOS .....	xi
1 INTRODUÇÃO.....	1
1.1 OBJECTIVOS .....	4
2 ANÁLISE AO ESTADO DA ARTE.....	5
2.1 Veículos elétricos .....	5
2.2 Travagem regenerativa .....	7
2.3 Motores elétricos.....	7
2.3.1 Motor CC (com escovas) .....	9
2.3.2 Motor CA assíncrono de indução .....	10
2.3.3 Motores CA síncronos de ímanes permanentes (PMAC) .....	12
2.3.4 Motor CA síncrono de relutância comutada (SRM) .....	16
2.3.5 Avaliação de motores para veículos elétricos .....	17
2.3.6 Motor na roda ( <i>in-wheel motor</i> ) .....	19
2.3.7 Arrefecimento dos motores elétricos.....	22
2.4 Controladores .....	23
2.4.1 Controlo por PWM.....	24
2.5 Sistemas de armazenamento de energia .....	27
2.5.1 Baterias .....	28
2.5.2 Ultracondensadores .....	47
2.5.3 Células de combustível ( <i>Fuel Cell</i> ) .....	48
2.5.4 Sistemas mecânicos de armazenamento de energia .....	50
2.6 Transmissão mecânica.....	56
2.6.1 Rendimento de elementos de transmissão.....	58

2.7	Carregamento das baterias .....	59
2.7.1	Conectores .....	60
2.7.2	Postos de Carga.....	62
2.8	Segurança de veículos elétricos .....	68
2.9	Conclusões do capítulo .....	68
3	TRABALHO TEÓRICO.....	69
3.1	Rendimento do carro elétrico.....	69
3.1.1	Rendimento do motor .....	70
3.1.2	Rendimento e descarga da bateria .....	77
3.2	Dimensionamento do motor .....	82
3.3	Dimensionamento da bateria.....	92
3.4	Estimativa do consumo e autonomia .....	94
3.5	Conclusões do capítulo .....	100
4	TRABALHO PRÁTICO (EMPRESA SMS).....	101
4.1	Conversão do Buggy para elétrico.....	101
4.1.1	Correção da direção.....	102
4.1.2	Desenho 3D da estrutura para atravancamento do motor e das baterias .....	109
4.2	Otimização dos parâmetros do controlador do Little4 .....	121
4.2.1	Menu <i>Motor</i> .....	123
4.2.2	Submenu <i>Temperature control</i> .....	123
4.2.3	Menu <i>Motor control tuning</i> .....	125
4.2.4	Menu <i>Battery</i> .....	126
4.2.5	Menu <i>vehicle</i> .....	127
4.2.6	Menu <i>Current limits</i> .....	127
4.2.7	Menu <i>Throttle</i> .....	129
4.2.8	Menu <i>Brake</i> .....	130
4.2.9	Menu <i>Speed mode express</i> .....	130
4.2.10	Menu <i>Tech studio</i> .....	131
4.3	Melhorias no funcionamento do Little4 .....	131
4.4	Sugestões para melhorar o Little4 .....	144
4.5	Conclusões do capítulo .....	146
5	CONCLUSÕES.....	147
5.6	Trabalhos futuros .....	149

REFERÊNCIAS .....	151
BIBLIOGRAFIA .....	165
Anexo A - Características típicas para alguns tipos de baterias .....	167
Anexo B - Características do motor ABM de 4kW, do Little4 .....	169
Anexo C - Código em MATLAB do mapa de rendimento do motor do Little4 (4kW) .....	171
Anexo D - Diagrama em MATLAB Simulink .....	175
Anexo E - Dados do Little4, usados para <i>input</i> no MATLAB .....	177
Anexo F - Código em MATLAB (consumo através do NEDC) .....	179
Anexo G - Parâmetros do controlador .....	185
Anexo H - Consumo verificado em testes reais .....	187

## ABREVIATURAS

AGM - *Absorbent Glass Mat*  
BMS *Battery Management System*  
CA – Corrente alternada  
CAD – *Computer-aided design*  
CAT - *Compressed Air Technology*  
CC – Corrente continua  
CFT - *Clutched Flywheel Transmission*  
CFT - *Clutched Flywheel Transmission*  
CVT - *Continuously Variable Transmission*  
CVT - *Continuously Variable Transmission*  
DMFC - *Direct Methanol Fuel Cell*  
DoD - *depth of discharge*  
EV- *Electric Vehicles*  
FC - *Fuel cell*  
HEV- *Hybrid Electric Vehicles*  
HPA - *Hydraulic Power Assist*  
HRB - *hydraulic regenerative brake*  
IGBT - *Insulated Gate Bipolar Transistor*  
KERS - *Kinetic Energy Recovery Systems*  
LED – *Light Emitting Diode*  
MEMS - *Microelectromechanical systems*  
MOSFET - *Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor*  
NEDC - *New European Driving Cycle*  
OCV - *Open circuit voltage*  
PCI – Poder calorífico inferior de um combustível  
PEM – *Proton Exchange Membrane*  
PHEV- *Plug-in Hybrid Electric Vehicles*  
PMSM - *Permanent Magnet Synchronous Motor*  
PWM - *Pulse-Width Modulation*  
SCIB - *Super Charge Ion Battery*  
SLA - *sealed lead acid*  
SoC – *State of Charge*  
UPS – *Uninterruptible Power Supply*  
VRLA - *valve-regulated lead acid*  
VRLA - *Valve-Regulated Lead Acid*  
ZFAB - *Zinc Flow Air Battery*

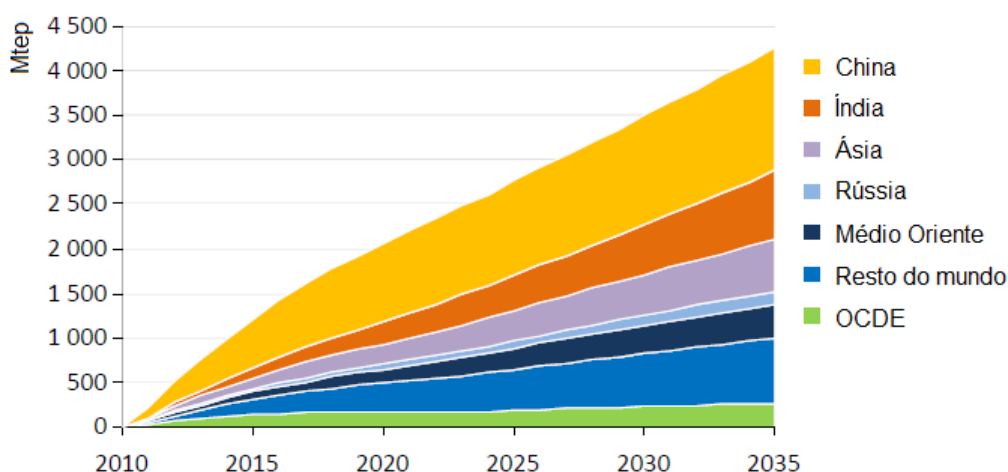
## SÍMBOLOS

$a$	Aceleração	m/s <sup>2</sup>
$A$	Área	m <sup>2</sup>
$AD_{sem}$	Autodescarga semanal	%
$Auton$	Autonomia	km
$\alpha$	Ângulo de escorregamento	(°)
$C$	Outras perdas	W
$C_{\alpha}$	Constante de rigidez em curva	-
$C_d$	Coefficiente de arrasto	-
$C_{necess}$	Capacidade necessária	Ah
$C_{nom}$	Capacidade nominal	Ah
$C_{bat}$	Capacidade do <i>pack</i> de baterias	Ah
$Cons$	Consumo	kWh/100km
$Cons_{access}$	Consumo dos acessórios	kWh/100km
$Cons_{med}$	Consumo médio	kWh/100km
$C_p$	Constante de Peukert	-
$C_T$	Capacidade em função da temperatura	Ah
$d$	Diâmetro	m
$DoD$	Profundidade de descarga	%
$E$	Energia	Wh
$E_{bat}$	Energia do <i>pack</i> de baterias	Wh
$E_{necess}$	Energia necessária	Wh
$f$	Frequência	Hz
$F_{ad}$	Força de arrasto	N
$F_{hc}$	Força para vencer um declive	N
$F_{la}$	Força para uma aceleração	N
$F_{rr}$	Força de resistente ao rolamento	N
$F_{sx}$	Força de escorreg. longitudinal	N
$F_{sy}$	Força de escorregamento lateral	N
$F_{te}$	Força de tração	N
$F_y$	Força centrífuga	N
$F_{\omega a}$	Força da aceleração angular	N
$g$	Gravidade	m/s <sup>2</sup>
$G$	Relação de transmissão	-
$I$	Intensidade de corrente	A
$I_R$	Momento de inércia	Kg/m <sup>2</sup>
$K$	Coefficiente	-
$kc$	Constante	-
$ki$	Constante	-
$kw$	Constante	-
$kx$	Coefficiente	-
$m$	Massa	kg

$n$	Constante	-
$nC$	Capacidade de descarga	Ah
$\eta$	Rendimento	-
$n_{cells}$	Nº de células da bateria	-
$N$	Velocidade de rotação	rpm
$N_{km}$	Número de quilómetros	-
$\eta_{motriz}$	Rendimento do motor	-
$nP$	Número de baterias em paralelo	-
$\eta_{regen}$	Rendimento da travagem regenerativa	-
$nS$	Número de baterias em série	-
$Ns$	Velocidade de sincronismo	rpm
$p$	Nº de pares de polos	-
$P_{EJ}$	Perdas por efeito de Joule	W
$P_m$	Potência motora	W
$P_{MAG}$	Perdas magnéticas	W
$P_{MEC}$	Perdas mecânicas	W
$P_{motriz}$	Potência motriz	W
$p_p$	Pressão dos pneus	bar
$P_{perd}$	Potência perdida	W
$P_{regen}$	Potência da travagem regenerativa	W
$r$	Raio do pneu	m
$R$	Resistência elétrica	$\Omega$
$r_C$	Raio da curva	m
$R_C$	Resistência interna da bateria	$\Omega$
$S$	Espaço percorrido	km
$SoC$	Estado de carga	%
$\beta$	Ângulo do declive	(°)
$T$	Binário	Nm
$T$	Temperatura	°C
$t_{desc}$	Tempo de descarga	h
$t_{nom}$	Tempo de descarga nominal	h
$U$	Tensão	V
$U_{OCV}$	Tensão em circuito aberto	V
$V_{bat}$	Tensão nominal do <i>pack</i> de baterias	V
$VC$	Velocidade do carro	m/s
$V_{unid}$	Tensão da bateria unitária	V
$V_W$	Velocidade do vento	m/s
$\Delta t$	Intervalo de tempo	h
$\mu_{rr}$	Coefficiente de atrito de rolamento	-
$\rho$	Densidade do ar	kg/m <sup>3</sup>
$\omega$	Velocidade angular	rad/s
$\dot{\omega}$	Aceleração angular	rad/s <sup>2</sup>

# 1 INTRODUÇÃO

No contexto mundial que se vive, o progresso e o bem-estar da sociedade, está ligado ao consumo de energia. O consumo de energia primária tem crescido principalmente em países em desenvolvimento, como a China que tem registado na última década aumentos bastante significativos no consumo de petróleo e prevê-se que continuará a aumentar nos próximos anos (Figura 1).

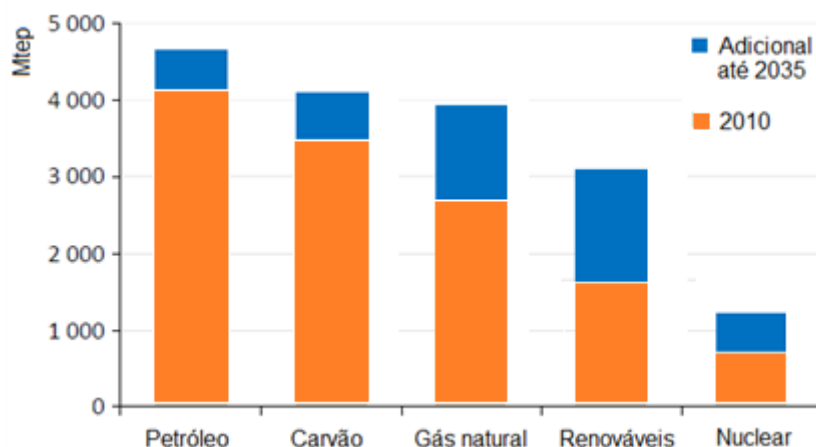


**Figura 1 – Previsão das necessidades de energia primária [1]**

A principal fonte de energia consumida em 2011, tem sido o petróleo, seguido pelo carvão e gás natural. Segundo [2] em 2011 o petróleo representou 33% do consumo, o carvão 30% e o gás natural 24%. O petróleo tem sido alvo de várias especulações pelos países que o detêm, a instabilidade política e militar não ajuda, causando inflação e flutuação dos preços, afectando todos os países consumidores.

Alguns dos desastres naturais que têm ocorrido nos últimos anos poderão estar associados à emissão de dióxido de carbono através da queima de combustíveis fósseis.

Nos próximos anos, em resposta ao aumento previsto de procura mundial, prevê-se um aumento da parcela do gás natural e das energias renováveis, que será mais significativo do que as restantes formas de energia (Figura 2). As energias renováveis poderão fornecer 30% da geração adicional até 2035. Este tipo de energias tem benefícios ambientais e/ou custos de produção mínimos, no entanto requerem um grande investimento inicial [1]



**Figura 2 – Distribuição das formas de energia consumida [1]**

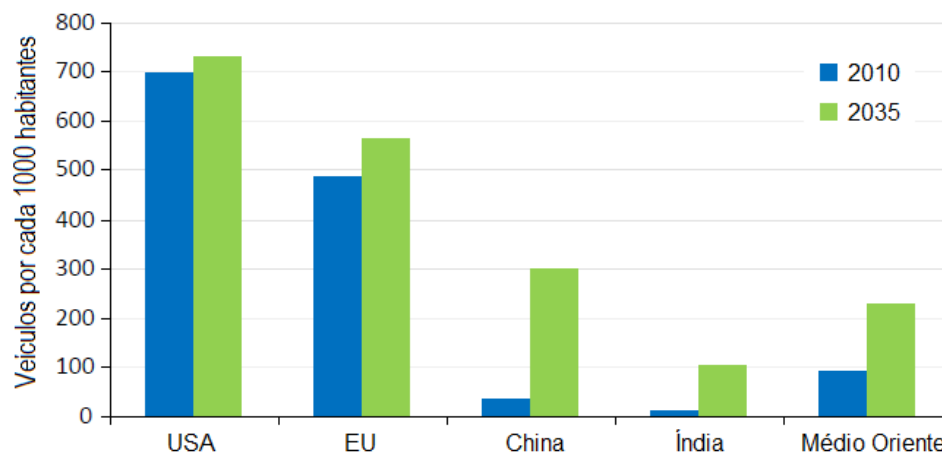
Por conseguinte, faz sentido que se procure novas formas de utilização ou conversão de energia, cada vez mais eficientes, por forma a atenuar o problema. Os países mais desenvolvidos têm vindo a diversificar o tipo de energia que consomem, procurando energias alternativas (hídrica, eólica, solar, geotérmica, biomassa, das ondas e das marés) de forma a reduzirem a dependência do petróleo e a diminuir os gases com efeito de estufa. Em <sup>(1)</sup> pode ter-se acesso a mapas do mundo onde existe potencial de implantação de cada uma destas energias alternativas. Alguns países como a China, Índia, Rússia, Japão, Coreia do Sul e EUA têm aumentado a sua capacidade nuclear, respondendo assim ao aumento de procura energética [3].

O sector dos transportes tem um grande peso no consumo de combustíveis fósseis. A OECD (*Organisation for Economic Co-operation and Development*) prevê um aumento dos veículos de passageiros nas próximas décadas, que ocorrerá principalmente na China, Índia e Médio Oriente como ilustra a Figura 3.

---

<sup>1</sup> <http://www.geni.org/globalenergy/library/renewable-energy-resources/globalmaps.shtml>





**Figura 3 – Distribuição atual e previsão de crescimento para o número de veículos [1]**

Os veículos elétricos podem atenuar a dependência energética dos países que não possuem petróleo, além disso podem vir a ter um papel importante na diminuição da concentração de gases com efeito de estufa e na despoluição nas grandes cidades. A eletricidade para os veículos elétricos poderá ser produzida através de energias renováveis, ou através das novas tecnologias de queima de carvão (*Clean Coal Technologies*) em modernas centrais com elevado rendimento de queima e com controlo de poluição apertado [4] de forma a reduzir as emissões poluentes.

A utilização em massa dos veículos elétricos tem vindo a acentuar-se nos domínios do debate público [5]. No entanto a implementação prática só acontecerá se os veículos forem realmente vantajosos em termos de custo e consumo. O argumento de que são ecológicos, muitas vezes chamados de veículos “verdes”, por si só, não convence a maior parte das pessoas a comprarem. Além disso, esse argumento é discutível, pois uma parte da produção da energia eléctrica faz-se à custa da queima de combustíveis fósseis, o que deixa também uma marca negativa chamada de “pegada ecológica”. Os resíduos perigosos da produção de componentes (por exemplo as baterias) também devem ser considerados quando se fala em ecologia.

Os carros elétricos atuais são em geral caros e têm pouca autonomia em relação aos de combustão interna (exceptuando os muito caros). Para singrarem no mercado, as suas baterias têm de aumentar a densidade energética e baixar o custo de fabrico. As perdas de conversão de energia deverão ser minimizadas. A dispensa de acessórios supérfluos poderá vir a ser uma característica do veículo elétrico, tornando a carroçaria mais leve.

Assim torna-se imperativo que se perceba o funcionamento dos carros elétricos, para que se possa melhorar o rendimento, aumentar a autonomia, baixar o custo e em geral tornar o veículo elétrico mais competitivo.

## **1.1 OBJECTIVOS**

Este trabalho tem como objetivo de suporte, uma análise ao estado da arte sobre os veículos elétricos, onde deverá constar o funcionamento dos principais órgãos, como por exemplo: o motor, a bateria, o controlador e os sistemas de transmissão. A abordagem ao estado da arte deverá permitir a obtenção de conhecimentos fundamentais acerca da mobilidade elétrica, que possibilitem ultrapassar os obstáculos que porventura possam surgir no decorrer do presente trabalho. Deverá também induzir a percepção da evolução de cada sistema ao longo do tempo.

Os principais objetivos assentam na realização de dois trabalhos, um teórico e um prático. No trabalho teórico será feita uma análise às características energéticas do carro elétrico, onde conste o rendimento dos principais órgãos, a estimativa do consumo e a autonomia. Será também abordado o processo de dimensionamento do motor e da bateria.

A parte prática, feita em colaboração com a empresa SMS, tem como objetivos a conversão de um “Buggy” de motorização a gasolina para motorização elétrica, incluindo os respectivos cálculos para aferir a potência do motor e bateria, bem como o desenho dos acessórios necessários à conversão.

Consta ainda do trabalho prático a otimização dos parâmetros do controlador do motor do Little4 (carro que é fabricado na referida empresa) tendo em vista que o motor aquece demasiado no verão.

## 2 ANÁLISE AO ESTADO DA ARTE

Neste capítulo faz-se referência aos órgãos que constituem um veículo elétrico e elabora-se uma análise detalhada sobre cada um deles. Este estudo é vital para que se perceba a importância de cada órgão e de que forma este pode afectar o funcionamento do conjunto. É igualmente importante saber o estado da evolução desses componentes e o rumo que estão a seguir as soluções adoptadas nos novos veículos.

### 2.1 Veículos elétricos

Existem veículos elétricos desde há muito, embora estivessem quase esquecidos durante décadas. Os primeiros protótipos de veículos elétricos tiveram desenvolvimento no início do séc. XIX [6], alguns eram do tipo carruagem e rodavam sobre carris e outros dispunham de 3 ou 4 rodas para circular em caminhos de terra batida. A sua maior expansão deu-se mais tarde, após o aperfeiçoamento da bateria recarregável de chumbo-ácido (meados do século XIX). Nos seus anos dourados (1900), estes carros eram detentores de recordes de velocidade.

Martins *et al.* [6] refere que a quebra da barreira de velocidade dos 100 km/h, por Camille Jenatzy, deu-se em Abril de 1899, no seu veículo elétrico em forma de foguete (apelidado de *La Jamais Contente*). A mesma fonte refere que apesar de, nessa época já existirem veículos a gasolina e a vapor, a maior fiabilidade, a ausência de fumos, vibrações, ruído e o arranque a frio eram os principais motivos para que os veículos elétricos fossem os mais procurados.



**Figura 4 – Carro elétrico Baker de 1915 [7]**

Entretanto a abertura de novos poços de petróleo, baixou o preço da gasolina. O sistema de produção em massa de Henry Ford veio baixar o custo de produção dos carros a gasolina. A invenção do motor de arranque elétrico (1912) eliminou outra das grandes desvantagens do carro a combustão, o difícil arranque. Tudo isto, aliado a uma maior autonomia dos carros a gasolina, veio afrouxar o interesse pelos carros elétricos.

Mais tarde, com as crises do petróleo em meados dos anos 70, a necessidade de alternativas ao uso dos combustíveis convencionais, veio despertar novamente o interesse no desenvolvimento dos carros elétricos.

O EV1 da General Motors foi o paradigma da nova geração de carros elétricos pós- crise petrolífera e comercializado (através de *leasing*) entre 1996 e 1999. O carro era aprimorado, tinha um bom desempenho e uma autonomia bastante aceitável, inicialmente entre 90 a 120 km e mais tarde (com baterias de NiMH) entre 120 a 240km. A velocidade máxima estava limitada electronicamente a 130 km/h.

Em 2004, a General Motors recolheu todos os EV1 do mercado, e estes veículos foram simplesmente destruídos. Interesses petrolíferos e limitações tecnológicas poderão ter sido a causa do sucedido. Existe um documentário sobre o assunto, realizado em 2006 com o título “*Who Killed the Electric Car?*”.

Nos dias que correm assiste-se a uma grande mudança na estratégia dos grandes construtores de automóveis. Marcas como a Honda, Toyota, Nissan, General Motors, Peugeot, entre outras, têm modelos híbridos nos seus catálogos. No geral todas as grandes marcas anunciam também modelos totalmente elétricos, algumas delas já os comercializam em Portugal (Smart, Nissan, Peugeot, Mitsubishi, Citroën e Renault).

A produção em pequenas séries de veículos elétricos e a sua configuração relativamente simples, favoreceu a proliferação de construtores de pequena dimensão, alguns dedicados exclusivamente ao fabrico de carros elétricos. São disso exemplo os modelos como o Reva, Futi, Little4, Tazzari, Melex, Alka Dilixi, Zenn, entre outros.

Foi recentemente apresentado na feira *Paris Airshow 2011* um avião elétrico para o transporte de passageiros, denominado *Voltair*. É um projeto da empresa europeia de aviação EADS e poderá

começar a voar daqui a 25 anos. A mesma fonte revela que este avião será equipado com dois motores elétricos supercondutores (poderão ter uma perda por efeito de joule praticamente nula) e as suas duas baterias (de íões de lítio) serão removíveis, para troca no aeroporto, por baterias já carregadas.

Num futuro próximo, esperam-se grandes mudanças. Os fabricantes de componentes para automóveis a combustão terão de adequar as suas fábricas de forma a poderem produzir componentes para veículos elétricos; os postos de abastecimento de combustível poderão ter de se adaptar para postos mistos, onde figure abastecimento elétrico. A segurança com os carros elétricos terá de ser repensada à medida que estes carros evoluírem, Principalmente com as baterias, que podem ser perigosas em situações de carga defeituosa, ou na ocorrência de acidentes (derrame ou incêndio). Quanto à proteção dos peões, dado que os carros elétricos são silenciosos, poderá vir a ser obrigatória a instalação de dispositivos sonoros de aviso.

## **2.2 Travagem regenerativa**

Numa travagem normal a energia cinética é transformada em energia térmica, por atrito, sendo dissipada nos discos e pastilhas de travão. A travagem regenerativa consegue recuperar e armazenar parte dessa energia, de forma que esta possa ser reutilizada como força motriz. Assim o rendimento global do veículo poderá aumentar significativamente, nomeadamente em percursos citadinos, além de diminuir o custo de manutenção associado ao desgaste dos travões.

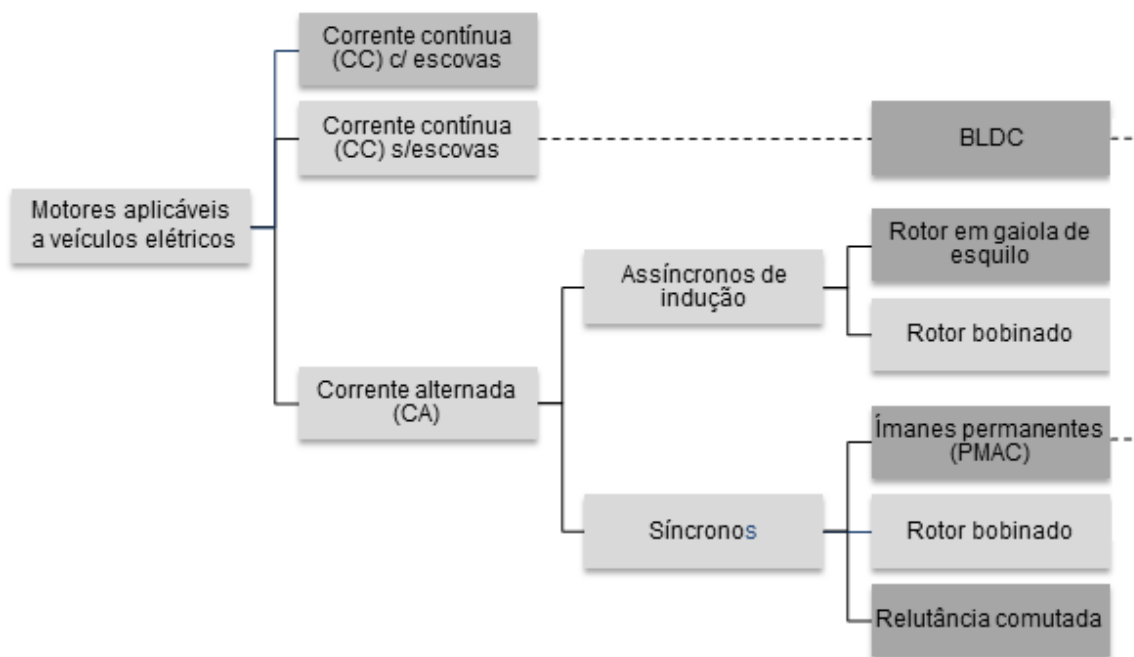
Existem vários sistemas que permitem recuperar a energia da travagem, o mais comum é usar o motor elétrico como gerador. Existem outros sistemas baseados em volantes de inércia (*flywheel*) e hidráulicos. Estes sistemas serão abordados mais à frente.

## **2.3 Motores elétricos**

O motor elétrico converte energia eléctrica em energia mecânica usada para a tração do automóvel. Segundo [8] os cinco tipos de motores mais usados em veículos elétricos são: motor de corrente contínua (CC), motor de indução, motor síncrono de ímanes permanentes PMS (ou BLAC), motor de relutância comutado SRM e motor CC sem escovas BLDC.

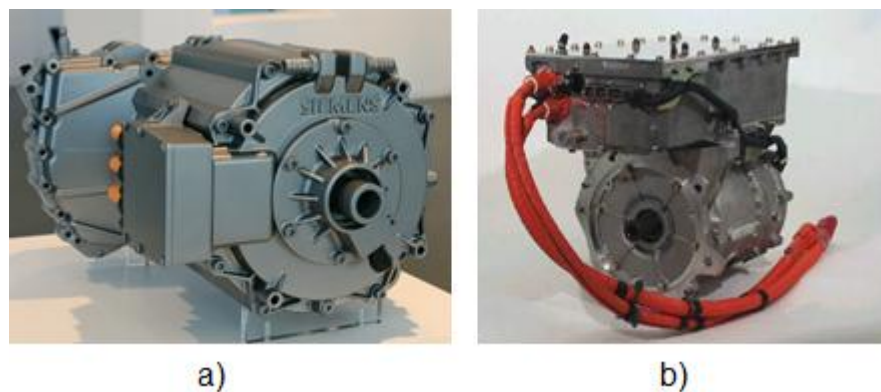
Os fabricantes de motores elétricos têm vindo a desenvolver vários tipos de motores com vista à aplicação em veículos elétricos. Os chineses têm desenvolvido mais os motores de ímanes permanentes, por possuírem materiais para o fabrico de ímanes, chamados de “terras raras” (lantânio, samário e neodímio). Contrariamente, a agência americana de energia ARPA-E [9] refere avultados investimentos no programa, “*Rare Earth Alternatives in Critical Technologies*”, apesar da diplomacia chinesa ter garantido publicamente que não colocaria problemas à exportação desses produtos para a América.

A Figura 5 mostra um diagrama de blocos com motores elétricos. A cor em destaque representa os motores mais adequados para veículos elétricos. O motor CC com escovas foi caindo em desuso por necessitar de manutenção (mudança de escovas e limpeza do coletor), e pelo aparecimento do controlo para motores de corrente alternada (síncronos e de indução) [10]. O motor de relutância comutada não era apropriado para veículos elétricos, por ter baixa densidade de potência, o que requeria motores grandes e pesados, no entanto novos desenvolvimentos tornaram este motor bastante promissor para uso em veículos elétricos [11].



**Figura 5 - Diagrama em árvore, dos motores mais aplicáveis a veículos elétricos**

Os pormenores do funcionamento de cada um destes tipos de motor elétrico não serão aqui abordados, por estarem já bastante difundidos, mas deixa-se um endereço <sup>(2)</sup> (existem muitos), com animações que auxiliam na compreensão do seu funcionamento. Mais informação poderá ser encontrada através dos fabricantes. Apresenta-se algumas marcas de motores para veículos elétricos, como a LMC (Lynch motor company), ABB, ABM, Iskra-AE, Siemens, Hitachi, GM, Apex, Agni, Kostov-motors. A título de exemplo, a Figura 6 mostra dois motores usados em veículos elétricos.



**Figura 6 - Motores para veículos elétricos: a) Siemens [12], b) Hitachi [13]**

O primeiro motor (Figura 6a) foi desenvolvido pela Siemens em parceria com a Volvo e é um motor arrefecido a água. O segundo motor da mesma figura foi feito pela Hitachi tendo o inversor acoplado por cima deste.

### **2.3.1 Motor CC (com escovas)**

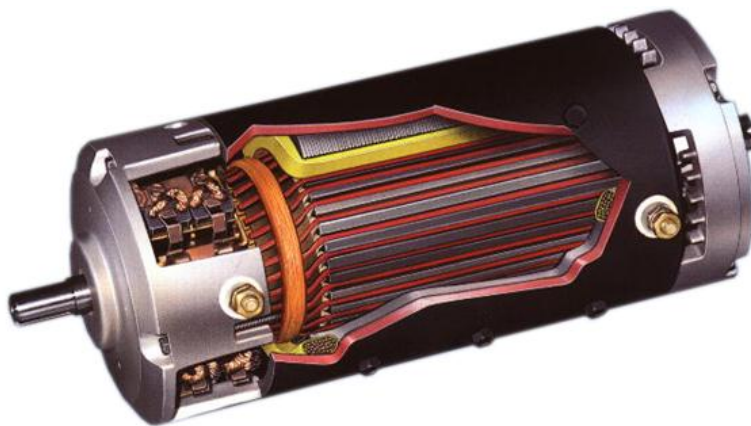
O motor CC pode ter os enrolamentos do indutor e do induzido ligados em série ou em paralelo. No geral, de grosso modo, os motores CC em série podem ser considerados por operarem a “potência constante” e os motores CC em paralelo (*shunt*) podem ser considerados por operarem a “velocidade constante” [14]. O motor CC em série tem características de binário e velocidade ideais para tração e pode ser usado em veículos elétricos [14], apesar de estar em desuso, como foi referido.

---

<sup>2</sup> <http://www.animations.physics.unsw.edu.au/jw/electricmotors.html>

O motor geralmente é monofásico CC, mas pode ser projetado para funcionar com CA (por isso, também se apelida de motor universal). Com CA não alcança a mesma performance que com CC, tem mais perdas reduz a força eletromotriz e a velocidade [10].

Segundo a Siemens [15], este tipo de motor tem como vantagens, elevado binário disponível em baixas velocidades de rotação, ampla variação de velocidade e um controlo relativamente fácil. O controlo pode ser feito por resistências [10]. No entanto, têm menor rendimento e são mais caros que os motores de indução, para além disso necessitam de manutenção (mudança de escovas e limpeza de coletores) [15]. Na Figura 7 pode ver-se este tipo de motor.



**Figura 7 – Motor CC em série comutado, em corte [16]**

A partir dos anos 90, o sucesso dos inversores permitiu o controlo de velocidade nos motores de indução, diminuindo o uso dos motores CC com escovas [17].

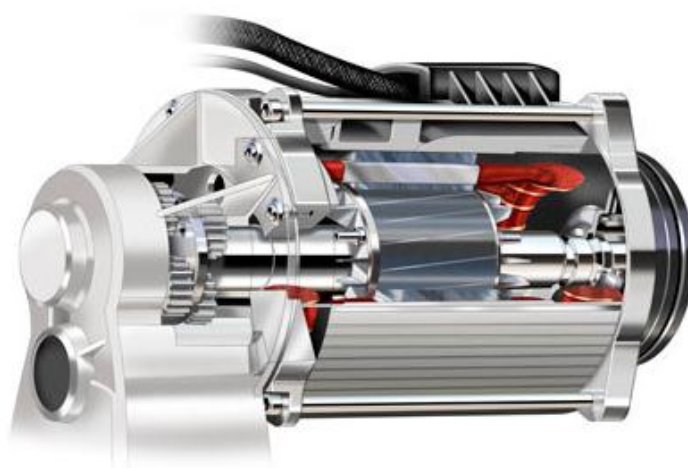
### **2.3.2 Motor CA assíncrono de indução**

O motor CA assíncrono de indução funciona com um campo magnético rotativo, criado através de uma tensão alternada (trifásica ou monofásica) aplicada nos enrolamentos do estator. O campo magnético do rotor tende a alinhar-se com o campo do estator, sendo induzida uma força electromotriz que produz o movimento de rotação do rotor. A velocidade de rotação do rotor, tem um ligeiro atraso em relação ao campo magnético girante, devido à carga aplicada ao motor, daí a designação de motor assíncrono. Esse atraso, também designado de deslizamento, será tanto maior quanto maior for a carga. Um maior deslizamento também se traduzirá num maior aumento das perdas (no rotor por efeito de joule), o que significará um menor rendimento do motor [18].



O motor de indução pode ter o rotor em forma de gaiola de esquilo ou bobinado. O motor com rotor bobinado não é muito usado em veículos elétricos por possuir coletores com escovas e assim ser mais caro e obrigar a manutenção.

O rotor em gaiola de esquilo (Figura 8) é constituído por um núcleo ferroso no qual estão inseridas (com isolamento) barras de alumínio dispostas paralelamente umas em relação às outras e são ligadas nas extremidades por dois anéis. Estas barras condutoras estão dispostas com uma certa inclinação (que se assemelha a uma torção do rotor) para evitar vibrações devido à ação electromagnética entre o rotor e o estator. O estator é bobinado à semelhança de outros motores. A vantagem do rotor em gaiola de esquilo em relação ao rotor bobinado, é ter uma construção mais simples, mais barata, quase sem manutenção, resultando num motor bastante robusto. Porém o binário de arranque não é muito elevado.



**Figura 8 - Motor de indução com rotor em gaiola de esquilo, acoplado a uma caixa redutora [19]**

O custo destes motores é significativamente inferior ao dos motores síncronos de ímanes permanentes e não requer o uso de “terras raras” cujo monopólio é detido por poucos países. Este facto, aliado à sua simplicidade de construção e fiabilidade, levou a um renovado interesse de algumas marcas automóveis por esta tecnologia [20].

*Zeraoulia* [21] refere que surgiu recentemente uma nova tecnologia de motores de indução para tração. São motores em forma de disco e poderão possuir o mesmo binário de um motor de ímanes permanentes. Possuem potência constante ao longo de uma vasta gama de rotação, e podem operar a temperaturas mais elevadas e a uma maior velocidade do que os motores de indução convencionais.

Os custos de produção destes novos motores mantêm-se reduzidos tal como o dos motores de indução já existentes.

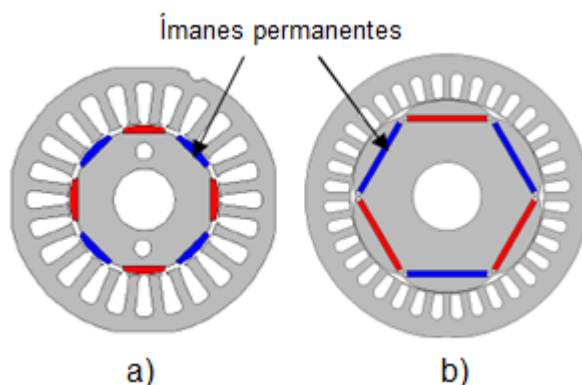
### **2.3.3 Motores CA síncronos de ímanes permanentes (PMAC)**

Os motores PMAC são motores síncronos de ímanes permanentes e corrente alternada, podem ser BLDC (*Brushless DC*) ou PMSM (*Permanent Magnet Synchronous Motor*) [22]. Possuem geralmente elevado binário (disponível desde o arranque e que pode ser constante para uma grande gama de velocidades), têm melhores rendimentos, e são mais pequenos (para a mesma relação de potências) do que os motores de indução. A sua principal desvantagem é o preço, devido ao custo dos ímanes (normalmente feitos a partir de *terras raras* como o neodímio, material de eleição).

O motor BLDC (*Brushless DC*) é também conhecido por ECM (*Electronically Commutated Motor*), não possui escovas sendo a comutação feita electronicamente. Assim este tipo de motor não tem os problemas associados à comutação por escovas, no entanto o controlo acrescenta um custo considerável na sua aplicação [14]. A comutação da corrente, entre os enrolamentos do estator, deve ser sincronizada com a posição do rotor, para tal são usados sensores, sendo comum usar sensores de efeito Hall e sensores ópticos [23].

Os BLDC requerem uma alimentação com onda retangular, em geral têm os ímanes montados à superfície do rotor (Figura 9a) e tem um controlo mais simples do que os motores PMSM. Este tipo de motor é usado em aplicações de baixa potência alguns poucos kW [24]. O motor BLDC é na verdade um motor CA, chama-se *Brushless DC* porque foi desenvolvido a partir do motor DC com escovas e porque as características de velocidade e binário são muito semelhantes aos motores CC com escovas [23].

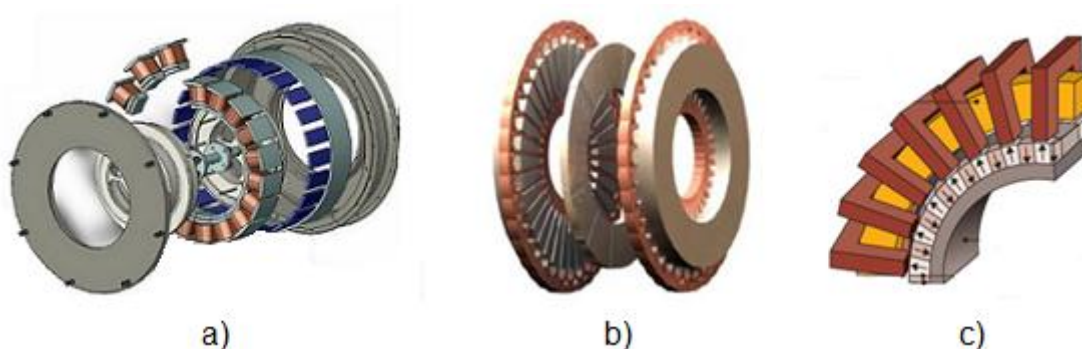
Os motores PMSM requerem uma alimentação com onda sinusoidal, podem ter os ímanes montados à superfície do rotor (Figura 9a) ou em posição interior (Figura 9b), tem um controlo mais complexo do que os BLDC, e necessitam de um sensor de corrente por cada fase (caso sejam trifásicos). São motores propícios a aplicações que necessitem de elevado desempenho [24].



**Figura 9 – Motores de ímãs permanentes: a) ímãs à superfície do rotor, b) ímãs interiores [24].**

Os motores de ímãs internos possuem mais vantagens do que os de ímãs superficiais, a configuração interna dos ímãs produz, além do binário eletromagnético, um binário de relutância o que se manifesta num binário resultante maior. Outra vantagem em relação ao motor de ímãs superficiais é que os ímãs internos ficam protegidos contra a força centrífuga, podendo rodar a velocidades mais elevadas [24].

Os motores de ímãs permanentes também podem ser classificados quanto ao fluxo magnético, na Figura 10 são mostradas algumas dessas configurações.



**Figura 10 – Motores de ímãs permanentes: a) de fluxo radial [25], b) de fluxo axial [26], c) de fluxo transverso [27]**

A configuração de fluxo radial requer alguns cuidados de projeto. Se os ímãs forem colocados no estator, os enrolamentos de cobre terão de ficar no rotor onde é mais difícil o escoamento de calor. Se os enrolamentos forem colocados no estator (onde é mais fácil arrefecer) os ímãs terão de ficar no rotor, o que no caso de ímãs à superfície, limita a velocidade (a força centrífuga pode descolar os ímãs). A Figura 11 mostra um motor de fluxo radial.



**Figura 11 - Motor PMSM de fluxo radial do Honda IMA [28]**

Os motores de fluxo axial, podem assumir três configurações: face simples, dupla face ou multidiscos (é como ter vários motores numa só carcaça) cada face é composta por um par de discos magnéticos (imane e bobine). Na Figura 12, pode ver-se um motor de face dupla.

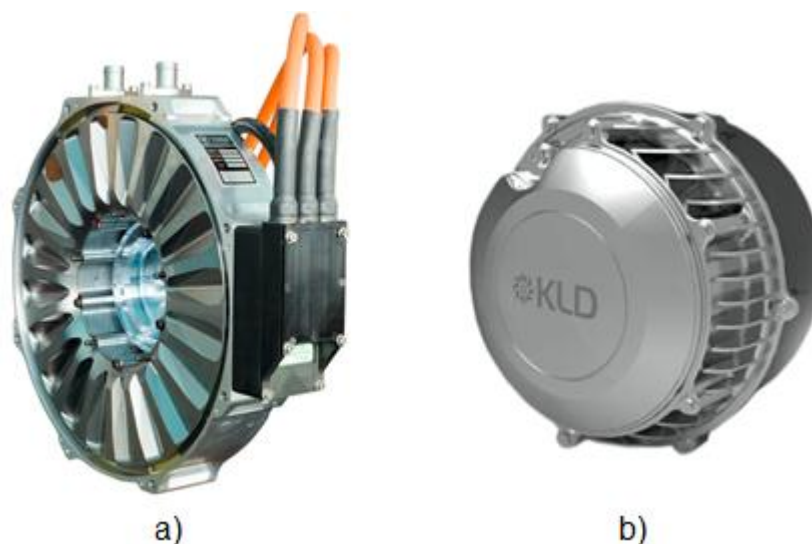


**Figura 12 – Motores PMSM de fluxo axial de face dupla: a) EVO [29]; b) APEX [30]**

Este tipo de motores tem várias vantagens em relação aos de fluxo radial: possuem elevada densidade de potência; elevados binários (devido a grandes diâmetros, a mesma força com braço maior); podem funcionar como volante de inércia (*flywheel*); são facilmente integrados dentro da roda do automóvel (dimensões axiais bastante reduzidas); a sua configuração permite a extração de calor do eixo para a periferia. Esta é uma vantagem importante dado que as altas temperaturas degradam o isolamento da bobinagem e os ímanes permanentes perdem o magnetismo. Só um bom escoamento de calor permite elevadas densidades de potência.

O desenvolvimento da tecnologia de fluxo transversal é recente, embora este tipo de motor tenha sido inventado em 1896 por WM Morday [31]. O motor possui uma construção complexa, à exceção do enrolamento de cobre (em anel central) que é mais simples de produzir do que noutros tipos de motores. Este motor pode ter um tamanho inferior aos de fluxo axial, para a mesma potência, no entanto tem um custo de produção elevado e ainda se encontra em fase de desenvolvimento.

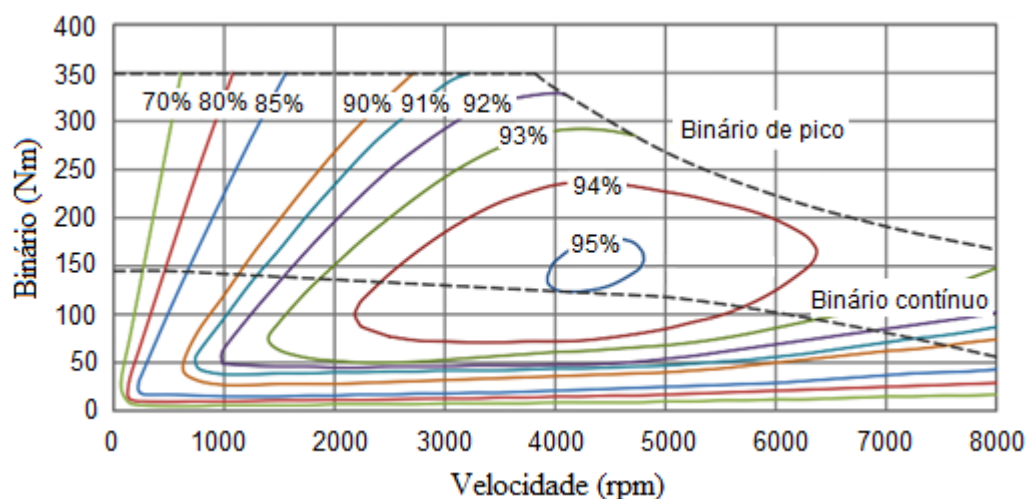
A Yasa Motors possui um motor de ímanes permanentes de fluxo axial (Figura 13a), com arrefecimento a água. Possui uma potência nominal de 50kW (100kW de pico), um binário de 400Nm (750Nm de pico) e um rendimento até 95%. O desenho permite a montagem de vários motores em empilhamento ao longo do eixo, obtendo um grupo de potência múltipla deste.



**Figura 13 – a) Motor Yasa, [32], b) motorKLD**

A marca asiática KLD desenvolveu um novo motor elétrico de ímanes permanentes (Figura 13b). O motor possui 5kW, um binário de pico de 140Nm e é arrefecido a ar. Foi projetado para a aplicação em *e-scooters* pela Eclimo (fabricante de veículos), cujo projeto está englobado num programa para revolucionar o mercado de veículos da Malásia e visa reduzir drasticamente a poluição do ar urbano [33].

Uma outra marca a EVO Electric, possui motores deste tipo. A figura mostra o mapa de rendimento de um motor PMSM de 64kW, de fluxo axial e arrefecido a água.



**Figura 14 – Mapa de rendimento do motor EVO Electric de 64kW [29]**

### 2.3.4 Motor CA síncrono de relutância comutada (SRM)

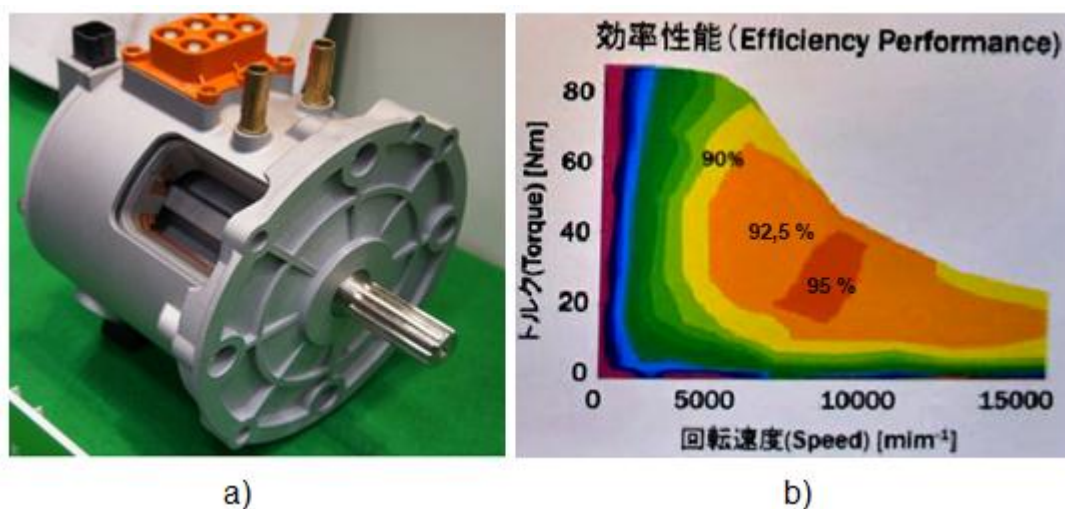
O motor de relutância comutada possui uma construção simples, robusta e de baixo custo [23], pode operar a velocidades elevadas, tem excelente controlabilidade e um bom rendimento [11]. Além disso funciona facilmente como gerador [34]. Como inconveniente, este motor possuía uma baixa densidade de potência (comparativamente com a generalidade dos motores elétricos) requerendo motores grandes e pesados, assim tornava-se inapropriado para veículos elétricos [11].

O desenvolvimento deste motor, nomeadamente por Akira Chiba (professor da Universidade de Tóquio), possibilitou um aumento na densidade de potência tornando o motor mais pequeno, e consequentemente bastante promissor para uso em veículos elétricos [11]. A construção do estator assemelha-se à de um motor de indução [23] e o rotor é constituído por ferro laminado (com pólos salientes). Este tipo de rotor permite o funcionamento a temperaturas elevadas. É uma vantagem em relação aos motores de ímanes permanentes, pois nesses, as altas temperaturas desmagnetizariam os ímanes.

O princípio de funcionamento do SRM é bastante simples, o binário é gerado pela tendência do rotor para alcançar uma posição do estator, onde a indutância e o fluxo produzido pelo bobinado do

estator, são máximos [35]. O binário contínuo é produzido por uma sincronização de excitação de cada fase com a posição do rotor [36].

Recentemente (janeiro de 2012) a empresa Nidec apresentou numa feira em Tokyo um novo motor SRM de 19kW (44kW de pico) com um binário de 50Nm (86Nm de pico) e uma rotação máxima de 12000 rpm. O motor tem um diâmetro de 177mm e pesa cerca de 26.5kg. A Figura 15 mostra as fotos desse motor e do mapa de rendimento, expostos na referida feira.







**Figura 15 – a) motor de tecnologia SRM da marca Nidec, b) respectivo mapa de rendimento [37]**

### **2.3.5 Avaliação de motores para veículos elétricos**

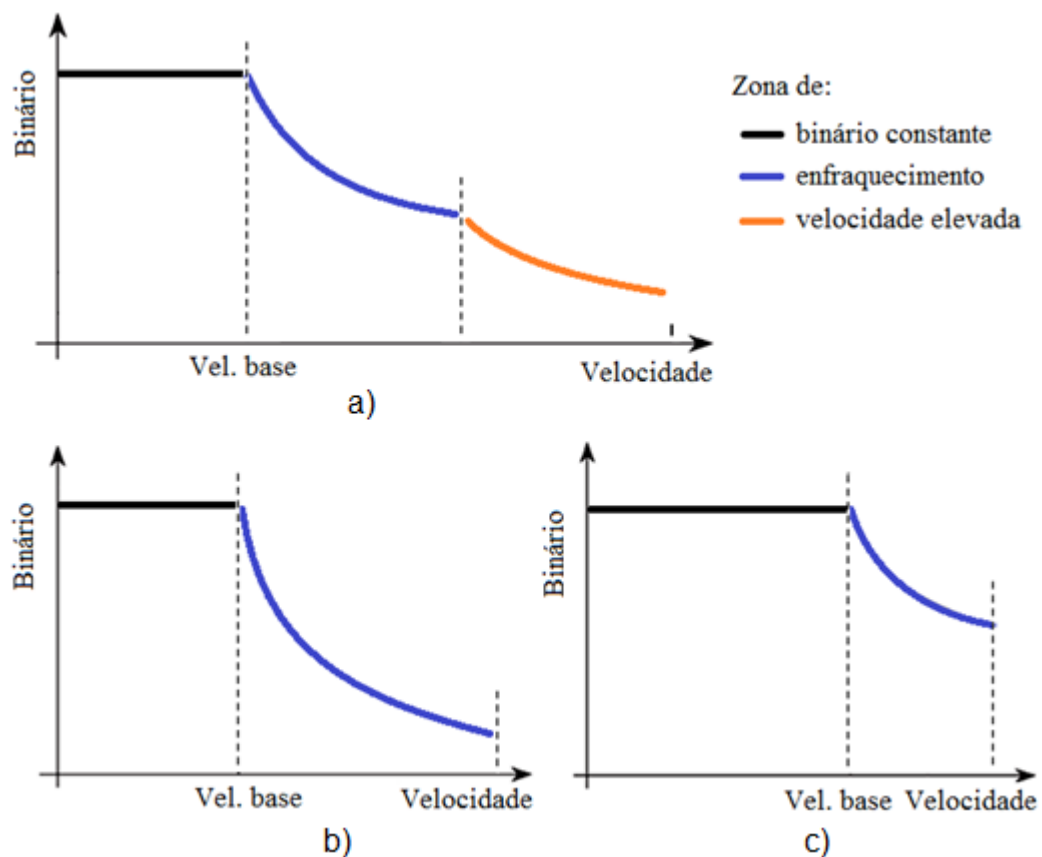
*Zeraoulia* [21] apresenta uma matriz de avaliação (Tabela 1) para quatro tecnologias de motores candidatos a veículos elétricos. São atribuídos valores de zero a cinco, sendo zero muito mau e cinco muito bom.

**Tabela 1 - Avaliação de tecnologias de motores elétricos (adaptado de [21])**

<div>Tipo de motor</div>	<div>CC (c/escovas)</div> 	<div>Indução</div> 	<div>Ímanes permanentes</div> 	<div>Relutância comutada</div> 
Densidade de potência	2,5	3,5	5	3,5
Rendimento	2,5	3,5	5	4
Controlabilidade	5	4	4	4
Fiabilidade	3	5	4	5
Maturidade tecnológica	5	5	4	4
Custo	4	5	3	4
<b>Total</b>	<b>22</b>	<b>26</b>	<b>25</b>	<b>24,5</b>

Na escolha de um motor para um veículo elétrico, além desta avaliação, o projeto deve ter em conta a zona típica de funcionamento do motor (Figura 16) de forma a poder aferir qual a melhor relação de transmissão ou mesmo se é recomendável a adopção de um sistema mecânico de variação de velocidade do tipo CVT.





**Figura 16 – Regime de funcionamento típico de motores elétricos: a) motor de indução; b) motor de relutância comutada; c) motor síncrono de ímanes permanentes [21]**

Nestes gráficos, a limitação do binário (zona de binário constante a traço preto) está associada ao limite de corrente a partir do qual, o calor produzido no arame de cobre do enrolamento, enfraquece o isolamento levando a uma menor longevidade do motor. A curva da zona de enfraquecimento (a traço azul) tem por limite a capacidade de dissipação de calor através dos materiais de construção do motor, e no caso de ímanes permanentes tem a ver com o limite a partir do qual poderia ocorrer o risco de desmagnetização dos ímanes (nos motores que os possuem).

### **2.3.6 Motor na roda (*in-wheel motor*)**

O conceito não é propriamente uma novidade, mas ganhou impulso com o interesse renovado pelos veículos elétricos. O motor é acoplado diretamente à roda, não precisa de outras ligações mecânicas como rodas dentadas ou cardans. Permite um maior controlo de tração do veículo, pois o binário em cada roda pode ser independente, o que é vantajoso para os sistemas de estabilidade do automóvel. Possibilita maior liberdade de desenho, ao eliminar os sistemas de transmissão, tornando o

automóvel mais leve, mais compacto e mais espaçoso. Finalmente, um único modelo de motor pode ser utilizado numa multiplicidade de modelos e para duas gamas de potência (consoante for aplicado a duas ou quatro rodas) proporcionando uma notável economia de escala. Na Figura 17 pode ver-se dois exemplos deste conceito: um motor a combustão interna e um motor elétrico aplicados em rodas de bicicleta.



**Figura 17 – Motores aplicados em cubos de rodas de bicicletas: a) motor de combustão interna [38],  
b) motor elétrico [39]**

O conceito *in-wheel motor* incorpora um motor de acionamento direto, o sistema de travagem, a suspensão e em alguns casos também a direção, tudo isto no espaço de atravancamento da roda. O motor de acionamento direto é um motor onde as suas partes constituintes são integradas na estrutura, podendo fazer parte desta. Não possui engrenagens e pode nem precisar de rolamentos.

A Michelin desenvolveu o sistema (*Active Wheel*) que é composto por um disco, uma pinça de travão, um motor elétrico, uma suspensão ativa e uma mola de suspensão. Outras marcas estão também a desenvolver este conceito, por exemplo: Protean, Evans Electric, Honda e Siemens. Na Figura 18 são mostradas imagens de algumas dessas rodas.



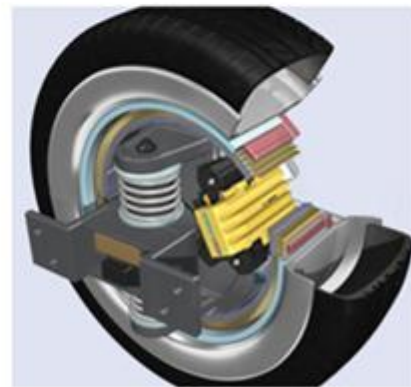
a)



b)



c)



d)

**Figura 18 - Exemplos de motores na roda: a) Honda, b) Protean, c) Michelin, d) Siemens**

Este conceito tem como principais vantagens a simplificação do sistema, dimensões mais compactas, redução de ruído, menores folgas e menor manutenção. A desvantagem é que não tendo engrenagens (relação de transmissão de 1:1) o motor terá de possuir elevado binário de arranque. Este problema pode ser resolvido colocando motores em todas as rodas do veículo, assim o binário de arranque solicitado a cada motor será uma fração do binário de arranque do veículo. No entanto, devido à inexistência de um diferencial mecânico, o controlo eletrónico deverá fazer a gestão correta da velocidade em cada roda.

Por curiosidade, a Honda no seu modelo movido a células de combustível (FCX Clarity) aplicou um conceito que, embora não seja de acionamento direto está próximo deste (Figura 19). Note-se que um dos veios que sai do diferencial passa através do veio do motor.



**Figura 19 - Motor do Honda FCX Clarity [40]**

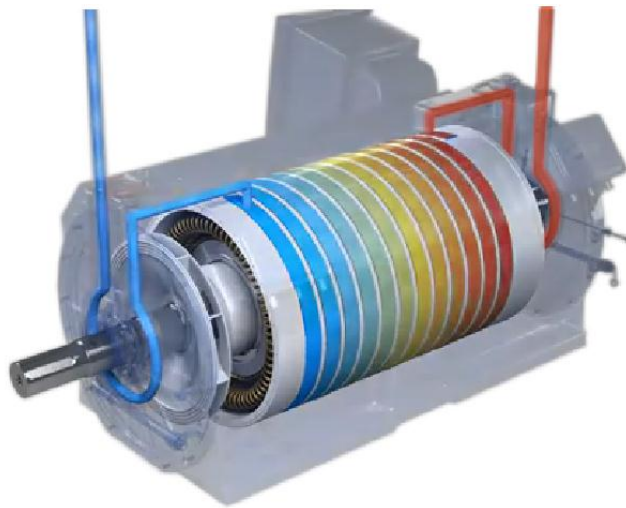
### **2.3.7 Arrefecimento dos motores elétricos**

Os motores elétricos geram calor devido às perdas elétricas e mecânicas referidas anteriormente, e que aumenta com a carga e velocidade de rotação. A norma IEC 60034 classifica os tipos de motores quanto ao tipo de arrefecimento. Existem muitos tipos de motores com arrefecimento mais ou menos elaborado, no entanto distinguem-se três grandes grupos: máquinas abertas, máquinas fechadas arrefecidas a ar ou a líquido.

Nas máquinas abertas, o ar circula pelo interior, agitado pelo rotor da máquina, e o calor é retirado, por convecção, através das aberturas para o exterior.

As carcaças das máquinas fechadas são fabricadas com materiais bons condutores, de forma a conduzir o calor a ser retirado. No caso de arrefecimento por ar, a superfície é alhetada e é arrefecida através de um ventilador. O ventilador pode ser acoplado ao eixo da máquina ou pode ser independente. Neste caso pode ainda possuir variação de velocidade em função da temperatura do motor.

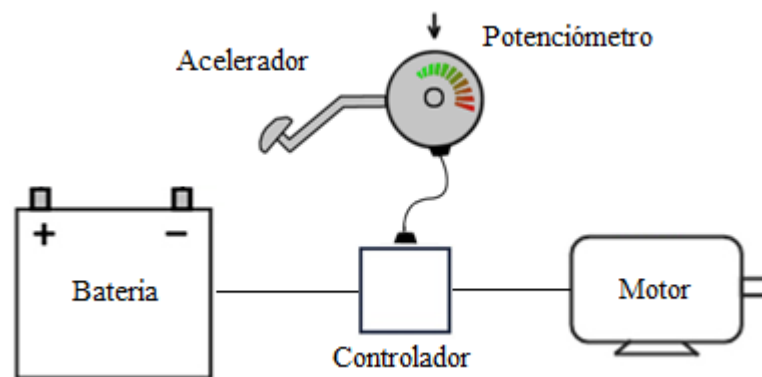
Os motores arrefecidos a líquido (água ou óleo) possuem canais entre a bobinagem do estator e a carcaça, onde circula um fluido que escoar o calor para o exterior da máquina, como é mostrado na Figura 20.



**Figura 20 – Transparência do motor elétrico WEG arrefecido a água [41]**

## 2.4 Controladores

O controlador do motor é o aparelho responsável por controlar parâmetros como a velocidade, a aceleração e em alguns casos pela travagem regenerativa dos veículos elétricos. Opera nos circuitos de potência e controlo, como se simplifica através do esquema da Figura 21.



**Figura 21 – Esquema simplificado do controlo de um veículo elétrico [42]**

Nos automóveis elétricos mais antigos, com motor CC, os controladores eram bastante simples, usavam potenciômetros, cuja resistência aumentava ou diminuía com a posição do pedal do acelerador. As resistências dos potenciômetros regulavam o fluxo de corrente entre as baterias e o motor, permitindo assim controlar a velocidade do carro. Estes controladores tinham pouco rendimento por causa do efeito de joule nas resistências.

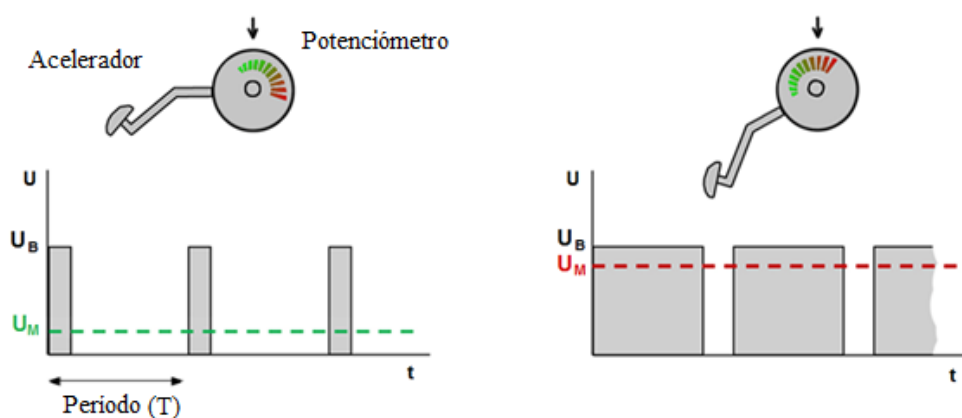
### 2.4.1 Controlo por PWM

Atualmente, muitos controladores funcionam por PWM (*Pulse-Width Modulation*) e aglomeram várias funções, podendo transformar tensão contínua em alternada (daí chamados de inversores, por inverterem o sinal da tensão) e regular o fluxo de corrente entre o motor e a bateria. Têm ainda as funções de inversão da rotação do motor (marcha-atrás) e a conversão do motor num gerador (travagem regenerativa).

A alimentação por PWM, comparada com a alimentação tradicional, acarreta alguns aspectos desfavoráveis ao motor: diminuição do rendimento, aumento da sua temperatura e aumento de ruído, pode levar a uma ligeira diminuição da vida útil [43].

Os controladores possuem microprocessadores que operam com pulsos de muito baixa potência, que é depois ampliada por MOSFET's (*Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor*) ou por IGBT's (*Insulated Gate Bipolar Transistor*). O funcionamento destes componentes afasta-se dos objectivos deste trabalho pelo que não será abordado.

Estes impulsos permitem ajustar a tensão que chega ao motor. Os impulsos (com durações na ordem dos milissegundos) são gerados por interruptores eletrónicos que ligam e desligam a uma determinada frequência. Quando se pretender uma elevada tensão, os impulsos serão longos, quando se pretender uma tensão baixa então os impulsos serão muito curtos, como se ilustra no esquema da Figura 22.



**Figura 22 – Relação entre o tempo (t) de duração dos impulsos de tensão (U) gerados pelo sistema PWM ao longo do período (T) e a posição do pedal do acelerador**

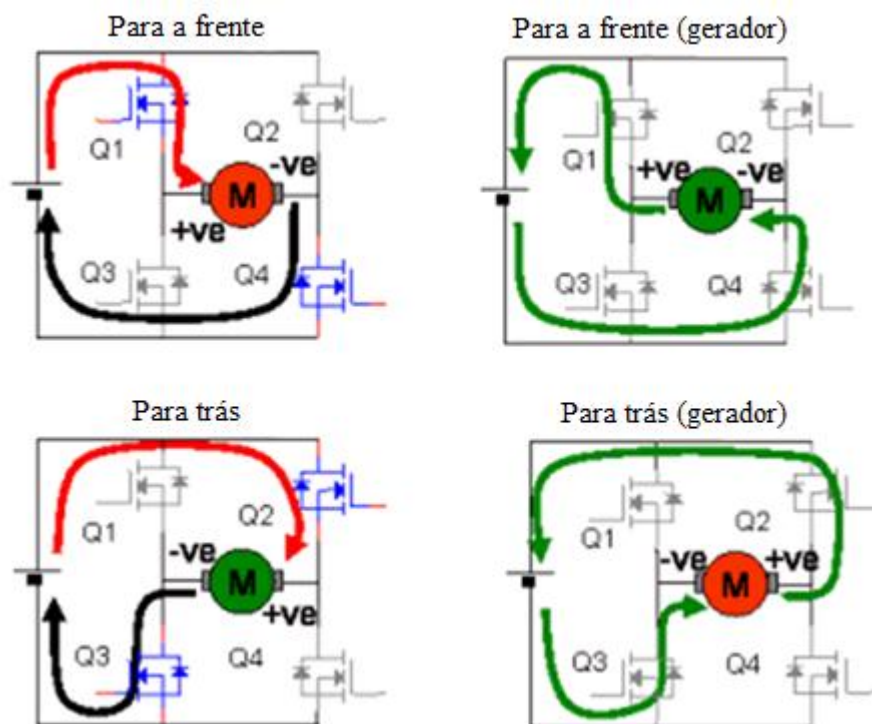
Segundo [42] a tensão que chega ao motor  $U_M$ , é dada pela área a cinzento (Figura 22), ou seja, a tensão da bateria  $U_B$  multiplicada pelo rácio entre o impulso  $t_{on}$  (interruptor ligado) e o período  $T$ . A equação pode ser escrita da seguinte forma:

$$U_M = U_B \times \frac{t_{on}}{T} \quad (1)$$

A corrente no motor  $I_M$ , obedece à clássica equação da potência eléctrica:

$$I_M = \frac{P_M}{U_M} \quad (2)$$

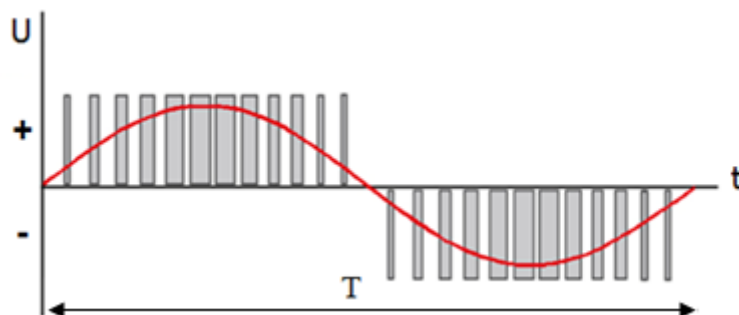
O controlador CC pode ser em ponte H, com quatro quadrantes, que através da lei das malhas e dos nós, permite alterar a polaridade e o sentido da corrente. Assim o motor pode rodar para a frente, para trás, e funcionar como gerador em ambos os sentidos, como se pode ver na Figura 23. O quadrante de funcionamento como gerador em marcha-atrás, na prática não é utilizado.



**Figura 23 - Esquema de funcionamento da ponte H para controladores de motores de CC [44]**



Os inversores CA funcionam de forma semelhante aos controladores de CC, com uma importante particularidade: invertem o sinal da corrente. Conseguem-no através do mesmo sistema (PWM) que conjuga a variação do tempo do pulso com o sinal para gerar uma curva aproximadamente sinusoidal, semelhante à da corrente alternada, como ilustra a Figura 24.



**Figura 24 - Sinusóide produzida por PWM**

Os impulsos (saídos do microprocessador) podem obedecer ao padrão sinusóide e simultaneamente podem ser mais ou menos longos (tal como já foi mostrado na Figura 22) o que faz variar a amplitude da sinusóide, isto é, a tensão alternada que chega ao motor. Para motores trifásicos, o respectivo inversor gera três sinusóides, desfasadas  $120^\circ$  entre si, de forma a obter as três fases de alimentação.

Além da variação de tensão, o controlador pode aumentar ou diminuir o tempo do período (T), variando assim a frequência  $f$ , que está relacionada com a velocidade do motor, como se mostra através da equação seguinte:

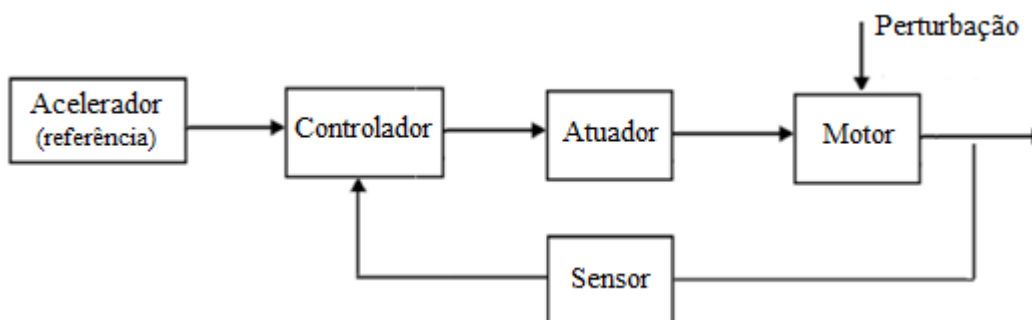
$$N_s = \frac{f}{p} \times 60 \quad (3)$$

Onde,  $N_s$  é a velocidade de sincronismo (em rpm) e  $p$  é o número de pares de pólos do motor.

O controlo do motor é feito em malha fechada (autorregulável) e de uma forma geral pode ser resumido no diagrama de blocos da Figura 25. Com base na posição do pedal do acelerador (imposta pelo utilizador) e na leitura da velocidade de saída do motor, o controlador ordena uma determinada atuação (aumento ou diminuição de tensão e/ou corrente) para obter uma determinada velocidade.

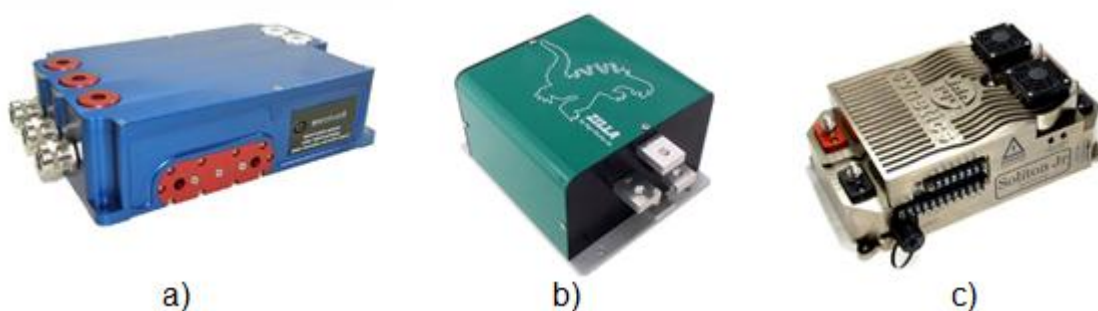


Trata-se de um sistema dinâmico que no caso de uma perturbação (por exemplo: o automóvel começa a subir uma rampa, ou a posição do acelerador é entretanto alterada), o sensor de rotação detecta a alteração e envia essa informação para o controlador que por sua vez vai responder de forma a repor a velocidade desejada, entrando assim num ciclo de controlo em malha fechada.



**Figura 25 - Diagrama de blocos do controlo do motor em malha fechada**

Alguns fabricantes de motores fornecem também o controlador, geralmente em *kits* de conversão. A Figura 26 mostra alguns exemplos de controladores.



**Figura 26 – Exemplos de controladores, a) Evolveit [45], b) Zilla [46], c) Evnetics [47]**

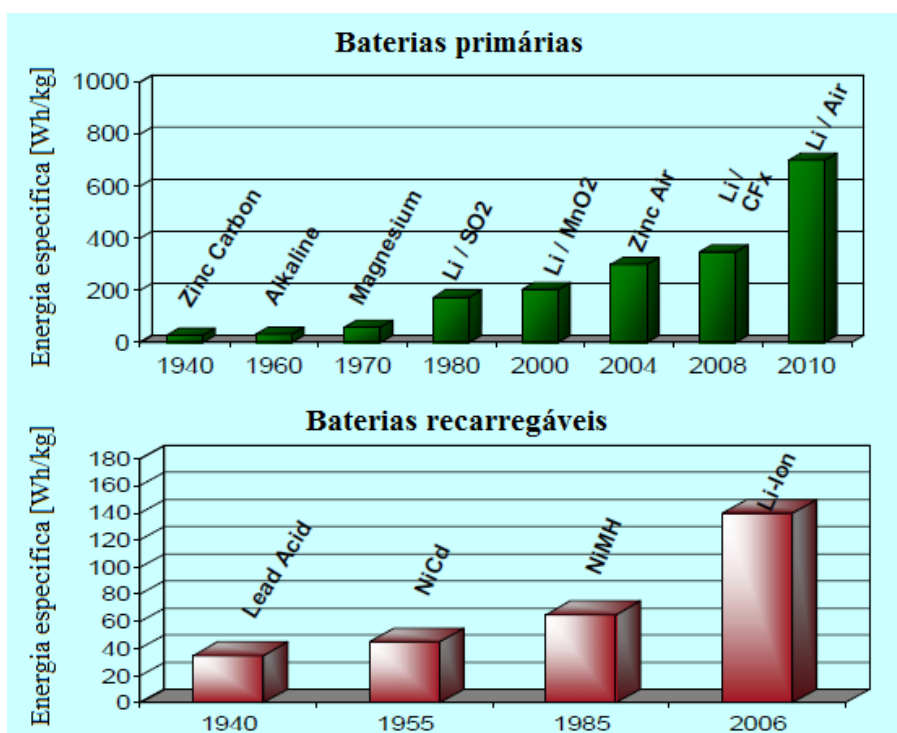
## 2.5 Sistemas de armazenamento de energia

Nos meios de transporte (naqueles que armazenam a bordo a energia que utilizam para a locomoção), quanto maior for a densidade mássica e volumétrica do armazenamento de energia, maior poderá ser a sua autonomia e menos frequentes as paragens para reabastecimento/recarga. No caso dos veículos elétricos as paragens para recarga são ainda bastante demoradas pelo que se torna imperativo o aproveitamento e maximização da energia armazenada.

Existem vários sistemas de armazenamento de energia, conforme o tipo de motorização em causa. Neste trabalho, apenas serão abordados os tipos de armazenamento relacionados com carros elétricos. Ao longo deste capítulo, aborda-se o assunto de uma forma mais ampla do que os outros temas, porque as limitações dos sistemas de armazenamento de energia, são atualmente um dos maiores obstáculos à difusão dos carros elétricos no mercado automóvel.

### 2.5.1 Baterias

Uma bateria é um dispositivo, composto por uma ou várias células unitárias, que convertem energia química em energia eléctrica e vice-versa. Definem-se em dois grandes grupos, as primárias e as secundárias, mais conhecidas por recarregáveis. Ambos os grupos têm sido desenvolvidos ao longo do tempo. Na Figura 27 ilustra-se a evolução da energia específica (Wh/kg) das baterias, do grupo primário e secundário, com destaque para as principais tecnologias usadas.



**Figura 27 – Evolução da energia específica de baterias [48]**

As baterias primárias estão prontas a fornecer energia logo que montadas. Estas baterias não podem ser recarregadas, por isso são para ser usadas e descartadas devendo ser recicladas.

Geralmente são utilizadas em dispositivos portáteis, como por exemplo: relógios, telecomandos, máquinas fotográficas, calculadoras, etc.

Tendo em conta a aplicação de baterias recarregáveis em veículos elétricos, este capítulo vai desenvolver uma abordagem às baterias do grupo secundário. Antes de ser feita a abordagem, faz-se uma descrição das principais especificações das baterias recarregáveis.

**Célula, bateria e *pack* de baterias:** uma célula é a unidade individual de uma bateria, por exemplo uma bateria de 12V possui 6 células de 2V (valores nominais). Juntando várias baterias, ligadas em série, em paralelo ou ambos, obtém-se um conjunto ao qual se chama *pack* de baterias.

**Autodescarga:** uma bateria descarrega-se com o tempo, mesmo sem ser usada, a isso chama-se autodescarga (expressa em % da capacidade e geralmente para 1 mês). A taxa de autodescarga pode aumentar com o aumento de temperatura, com a idade da bateria e com a humidade [49]

**“Efeito memória”:** a diminuição da capacidade de retenção de carga, vulgarmente conhecida por “viciação da bateria” e por “efeito memória”, altera a percentagem de armazenamento da bateria. Este efeito afeta principalmente as baterias de Ni-Cd [50].

**Energia específica e densidade de energia:** a energia específica relaciona a quantidade de energia que uma bateria pode armazenar com a massa dessa bateria e é expressa em kWh/kg. A densidade de energia é uma relação semelhante mas em relação ao volume ocupado por essa bateria e é expressa em kWh/L.

**Capacidade de uma bateria:** A capacidade de descarga de uma bateria (C) é expressa em (Ah) e representa o valor teórico de corrente que a bateria é capaz de fornecer durante uma hora de funcionamento a 25°C [51]. Por exemplo uma bateria de capacidade de 100Ah descarregada à taxa de 1C teoricamente debita 100A durante 1 hora, a mesma bateria descarregada à taxa de 0,5C debitará 50A durante 2 horas.

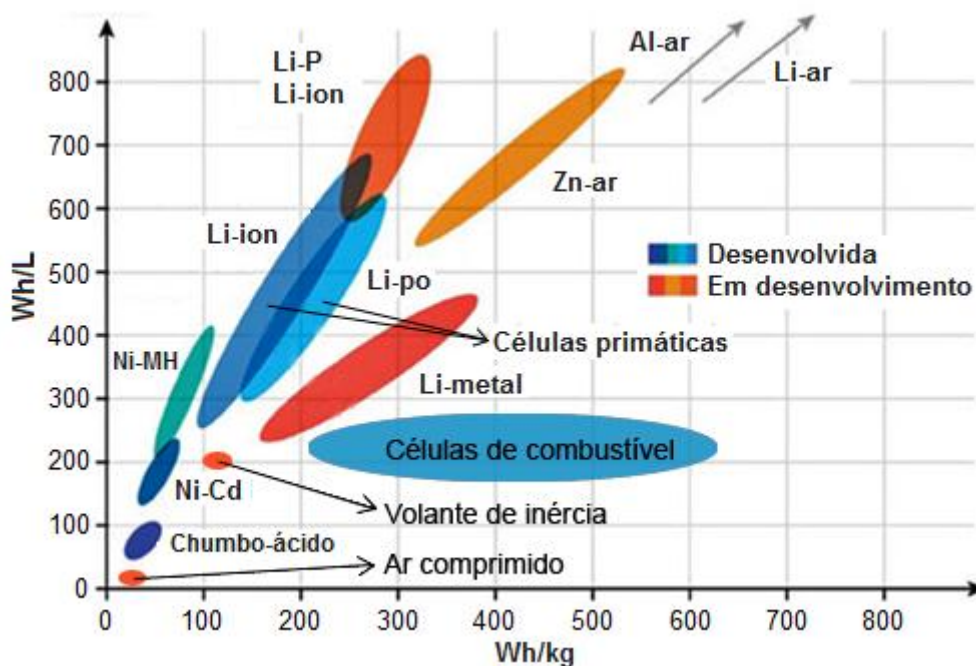
**SoC (*State of Charge*):** o estado de carga é a percentagem de carga que resta na bateria. Com a bateria carregada corresponde a 100% e conforme a bateria vai descarregando, o valor desce até 0% que corresponde à bateria completamente descarregada.

**DoD (Depth of Discharge):** é a percentagem de energia removida da bateria e vai aumentando conforme se vai descarregando a bateria. Convém referir que quanto maior for a DoD, menor tempo de vida útil terá a bateria, principalmente em baterias de chumbo-ácido.

**OCV (Open Circuit Voltage):** é a tensão medida nos terminais da bateria sem que estes estejam ligados a qualquer fonte de consumo.

**Vida útil:** geralmente é contabilizada em número de ciclos de carga/descarga que uma bateria poderá alcançar.

Como foi referido, dá-se início à abordagem às baterias do grupo secundário (recarregáveis), mostrando um quadro (Figura 28) onde se compara a densidade de energia, mássica e volumétrica dos vários sistemas de armazenamento de energia.



**Figura 28 - Densidade de energia (mássica e volumétrica) de vários tipos de sistemas de armazenamento de energia (adaptado de [52] [53] [54])**

Neste quadro os tons de azul referem-se a tecnologias que já se encontram maduras, e em tons alaranjados as tecnologias emergentes, por enquanto, ainda caras ou pouco fiáveis. As tecnologias Al-ar e Li-ar são muito recentes estando ainda em estudo, mas os seus autores preveem elevadas densidades energéticas. Cada uma destas tecnologias será abordada mais à frente.

Uma bateria para um veículo elétrico deve ter uma boa densidade energética (para garantir uma autonomia razoável do VE), boa capacidade de descarga (adequada à potência do VE), ser uma tecnologia segura e fiável, possuir um longo tempo de vida útil, ter um custo baixo, além disso causar o menor impacto ambiental possível. Para complementar a informação da Figura 29, coloca-se em anexo (A) uma tabela com as principais características dos principais tipos de baterias.

As diferentes características das baterias tornam-nas mais propícias a determinados usos do que outras. A Tabela 2 mostra algumas aplicações mais correntes para os vários tipos de tecnologias químicas de baterias recarregáveis.

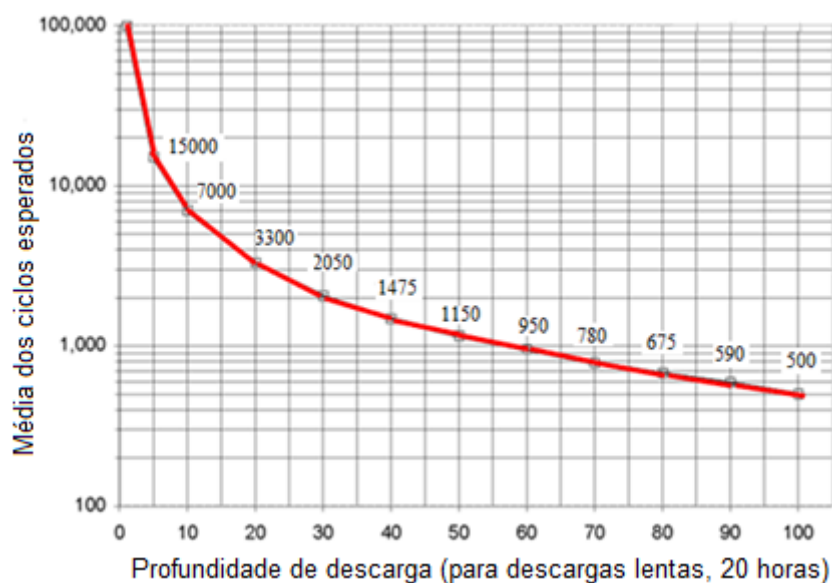
**Tabela 2 – Aplicações mais usuais das baterias recarregáveis**

	Aplicações típicas
<b>Chumbo-ácido</b>	Submarinos, automóveis, EVs, cadeiras de rodas, <i>scooter</i> es, <i>E-Bikes</i> e unidades UPS
<b>NiCd</b>	Aparelhos electrónicos, comandos, brinquedos, telemóveis, máquinas de furar portáteis e sinalização de emergência
<b>NiMH</b>	EVs, HEVs, locomotivas, computadores portáteis, telemóveis, aparelhos elétricos, instrumentos e equipamentos médicos
<b>Li-ion</b>	EVs, Computadores portáteis, telemóveis, máquinas fotográficas, aparelhos rádio modelismo e MP3
<b>LiFePO<sub>4</sub></b>	EVs, motos e bicicletas eléctricas, <i>SegWays</i> , <i>E-Bikes</i> , Computadores portáteis e aparelhos rádio modelismo

Deixa-se aqui o nome de alguns dos maiores fabricantes de baterias a nível mundial: NEC, Matsushita, Thunder Sky, Sanyo, Hitachi, LG, Continental, Life A123 systems, Saft, Bolloré, Toshiba.

#### **2.5.1.1 Chumbo-ácido (Lead-Acid)**

As baterias de chumbo-ácido têm capacidade de fornecer correntes elevadas em curtos períodos de tempo, são baratas e não têm “efeito memória”. Tipicamente a vida destas baterias situa-se entre os 500 e os 1000 ciclos [55]. Quanto menor for a profundidade de descarga usada, maior será a vida útil da bateria, como mostra a Figura 29. O rendimento depende das taxas de carga/descarga (corrente em função do tempo) que são impostas à bateria, bem como da temperatura de funcionamento.



**Figura 29 - Longevidade de baterias de chumbo-ácido versus profundidade de descarga [56]**

Durante o processo de carga de uma bateria de chumbo-ácido, deve-se ter especial cuidado para que a carga não seja excessiva, se isso ocorrer, a bateria pode “fervor” e emitir hidrogénio, que combinado com o oxigénio atmosférico resulta numa mistura altamente inflamável [49]. Aconselha-se fazer a carga em ambiente ventilado e com carregadores, ou parâmetros de carga, indicados pelo fabricante.

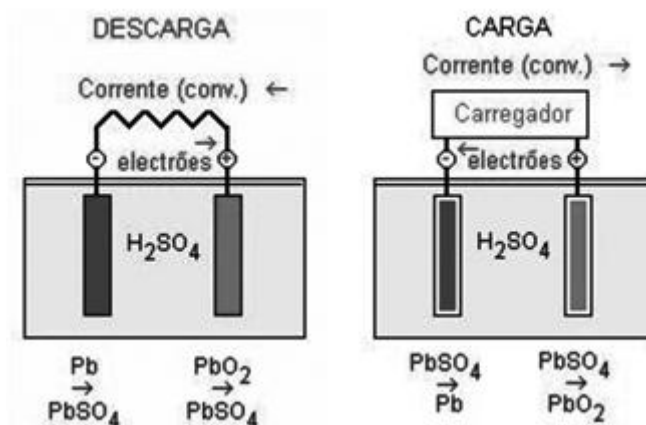
As baterias tradicionais requerem a manutenção do nível de líquido e podem ter problemas de derrame de electrólito. Como resposta a essas dificuldades, foi desenvolvida a bateria do tipo VRLA (*valve-regulated lead acid*), também conhecida por bateria de gel, e um outro tipo mais recente, a AGM (*Absorbent Glass Mat*) que tem um desempenho mais elevado do que o tipo convencional. É uma bateria de chumbo-ácido, com a particularidade do electrólito ser absorvido por esteiras de fibras de vidro (em vez das placas submersas em electrólito líquido). Ambos os tipos de baterias têm a vantagem de poder operar em qualquer posição e não precisam de manutenção. A Figura 30 mostra os constituintes típicos de uma bateria de chumbo-ácido.



**Figura 30 - Constituição de uma bateria de chumbo-ácido [57]**

O ácido sulfúrico contido nas baterias é muito corrosivo, devendo ser evitado o contacto com a pele e com as roupas. Este tipo de baterias não apresenta obstáculos quanto à sua reciclagem. Nos países da união Europeia, os pontos de venda são obrigados por lei a recolher as baterias em fim de vida. A percentagem de baterias de chumbo-ácido recicladas em todo o mundo ronda os 97% [58].

O processo químico das baterias de chumbo-ácido recorre a dois eléctrodos, o negativo de chumbo (Pb), e o positivo de óxido de chumbo (PbO<sub>2</sub>). Ambos são imersos num electrólito de água destilada (H<sub>2</sub>O) e ácido sulfúrico (H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>) como exibido na Figura 31.



**Figura 31 - Esquema de carga e descarga de baterias de chumbo-ácido [59]**

Em geral as baterias de chumbo-ácido apresentam as vantagens e desvantagens que se listam a seguir.

Vantagens:

- Baixo custo e de fabrico simples;
- Tecnologia madura, fiável, informação bastante difundida;
- Baixa autodescarga;
- Potência específica elevada, capaz de correntes de pico elevadas.

Desvantagens:

- Baixa relação entre energia acumulada e peso;
- Carga lenta (carregar totalmente pode demorar até 10 horas);
- Ciclo de vida limitado;
- Consideradas como resíduo perigoso pelo que é obrigatória a sua reciclagem;

### **2.5.1.2 Chumbo-cobalto (PbCo)**

A bateria de chumbo-cobalto foi desenvolvida em 1966, por Robert Raymond Aronsson, fundador da empresa EFP (*Electric Fuel Propulsion Corporation*) e foi usada nos carros *MARS II* que foram protagonistas nas duas célebres corridas *cross-country* realizadas nos EUA [60]. Esta bateria também é conhecida por tripolar, por possuir no seu interior, três barramentos colectores das placas, por cada polo.

O cobalto presente nesta bateria (como aditivo do electrólito) forma um revestimento das placas positivas, criando assim uma proteção contra sobrecargas.



Entretanto a empresa patenteou novos aperfeiçoamentos desta bateria e também alterou o nome para EAC (*Electric Auto Corporation*) [60]. Atualmente a empresa, ainda comercializa esta tecnologia de baterias, mas parece estar mais focada no desenvolvimento e comercialização de células de combustível AFC (*Apollo Fuel Cell.*) que serão abordadas no subcapítulo próprio, mais à frente. Refere-se ainda que a literatura recente da especialidade não aborda este tipo de Baterias.

### **2.5.1.3 Níquel-cádmio (NiCd)**

O uso de baterias de níquel-cádmio em aplicações de tração, segundo Root [61], cresceu um pouco antes da Segunda Guerra Mundial. A bateria de níquel-cádmio tem uma grande aceitação em todo o mundo, é utilizada em aplicações onde se pretende baixo custo, longa duração e alto débito de potência. São pequenas, leves, resistentes e podem ser sujeitas a cerca de 1000 ciclos de carga/descarga [53]. A Figura 32 mostra algumas baterias deste tipo.



**Figura 32 – Formas de baterias de NiCd [62] [63]**

A bateria de níquel-cádmio tem sido substituída progressivamente pelas baterias do tipo NiMH. A grande limitação do uso destas baterias em EV's é o seu “efeito memória” [50], incompatível com os ciclos de carga/descarga tipicamente irregulares nos EV's. Uma outra desvantagem é possuírem cádmio (metal tóxico) que obriga a uma reciclagem controlada da bateria [61].

### **2.5.1.4 Níquel-hidreto metálico (NiMH)**

Este tipo de bateria teve o início de desenvolvimento nos anos 70, no entanto só na década de 80 novos desenvolvimentos possibilitaram um maior avanço. Hoje as baterias NiMH fornecem 40 % mais

energia específica (Wh/kg) do que uma NiCd padrão. Uma outra vantagem é a ausência de metais tóxicos.

Segundo Martins *et al.* [6] nos anos 90 a patente deste tipo de baterias foi comprada por uma empresa petrolífera que limitou o seu uso a baterias de pequena capacidade, pelo que a partir daí apenas têm sido usadas em veículos híbridos. Paralelamente, o desenvolvimento das baterias Li-ion também reduziu o entusiasmo pela NiMH. De qualquer forma, alguns fabricantes de veículos híbridos (HEV- *hybrid electric vehicle*) ainda apostam nesta tecnologia por esta se encontrar madura, por ser mais barata (para a mesma quantidade de energia acumulada) e ter menores riscos de segurança (incêndio) do que as baterias de Li-ion (com exceção para as LiFePO<sub>4</sub>).

As baterias de NiMH devem ser carregadas de modo relativamente rápido, porque ao carregar de modo lento, dá-se uma formação cristalina que encurta o seu tempo de vida. Os carregadores para este tipo de baterias devem fazer a gestão entre a rapidez de carga e a temperatura máxima atingida, que deverá estar dentro dos valores admitidos pelo fabricante. Estes carregadores também devem interromper automaticamente o fornecimento de energia depois das baterias estarem carregadas, para que estas baterias não se degradem, pois este tipo de baterias não tolera bem as sobrecargas.

Expõe-se de seguida uma lista de vantagens e desvantagens das baterias de NiMH [53].

Vantagens:

- Capacidade de 30 a 40 % mais do que as baterias NiCd (para o mesmo peso);
- Menor “efeito memória” que as NiCd;
- Armazenamento e transporte simples, não sujeito a controlo regulamentar;
- Contém apenas materiais levemente tóxicos;
- Teor de níquel torna a reciclagem lucrativa.

Desvantagens:

- Vida útil limitada, uma descarga profunda reduz a vida útil;
- Não tolera bem a sobrecarga;
- Gera calor durante a carga rápida (reduzindo o rendimento);
- Elevada autodescarga;
- Redução do desempenho para altas temperaturas;
- Menor densidade energética que as baterias de tecnologia de Lítio.

#### ***2.5.1.5 Níquel-ferro (NiFe)***

Foram desenvolvidas por Edison no virar do século e chegaram a ser as baterias de eleição para os proprietários de veículos eléctricos endinheirados pois proporcionavam autonomias notáveis para a altura [6]. São conhecidas algumas aplicações, como por exemplo na sinalização ferroviária, em empilhadores industriais e em casas alimentadas por energia solar. Estas baterias são resistentes à sobrecarga e sobredescarga, e segundo [64] podem ter uma vida útil de mais de 25 anos. No entanto as baterias NiFe não foram muito apreciadas: tinham uma baixa energia específica (de 30 a 50Wh/kg) e um fraco rendimento (de 65 a 85%), para além de que sofrem de elevada autodescarga de 10 a 15% por mês [65].

#### ***2.5.1.6 Níquel-zinco (NiZn)***

Estas baterias são semelhantes às de níquel-cádmio onde é usado um electrólito alcalino e um eléctrodo de níquel. A patente desta tecnologia remonta a 1901, embora o seu desenvolvimento se tenha fomentado mais tarde nas décadas de 60 e 70. Tinha um ciclo de vida curto causado pelo crescimento de dendrites que levavam a curto-circuito interno [50]. Entretanto foi melhorado o electrólito, reduzindo assim este problema. As vantagens como o custo relativamente baixo, possuírem uma energia específica superior à bateria de NiCd e o facto de não causar grandes problemas ambientais, fez crescer um novo interesse comercial por este tipo de baterias [66].

#### ***2.5.1.7 Níquel-hidrogénio (NiH)***

Na década do desenvolvimento das baterias de NiMH (anos 70), a instabilidade destas levou a uma mudança para o desenvolvimento das de NiH. Segundo [26], as baterias de NiH são constituídas por um depósito de aço para armazenar os gases de hidrogénio a uma pressão de 8,270 MPa. A célula inclui eléctrodos de níquel sólido, eléctrodos de hidrogénio, telas de gás e um electrólito. Estes componentes são encapsulados sob pressão na bateria.

Estas baterias têm uma vida útil longa, um baixo efeito de autodescarga, e operam a uma boa gama de temperaturas, de -28 a 54°C, o que torna a bateria ideal para uso em satélites. Como desvantagens, tem uma baixa energia específica (40 a 75Wh/kg) e um elevado custo.

### 2.5.1.8 Iões de Lítio (Li-ion)

Dentro do tipo de baterias de Li-ion, existem muitos géneros que derivam deste. A diferença está principalmente nos materiais usados para o cátodo. Entretanto, novos materiais estão a ser desenvolvidos para o ânodo, de forma a modificar ou substituir a grafite usada tradicionalmente.

A família de baterias Li-ion é composta pelos seguintes membros, uns mais conhecidos do que outros: Lítio óxido de cobalto ( $\text{LiCoO}_2$ ), Lítio óxido de manganês ( $\text{LiMn}_2\text{O}_4$ ), Lítio ferro fosfato ( $\text{LiFePO}_4$ ), Lítio níquel manganês óxido de cobalto ( $\text{LiNiMnCoO}_2$ ), Lítio níquel cobalto óxido de alumínio ( $\text{LiNiCoAlO}_2$ ), lítio titanado ( $\text{Li}_4\text{Ti}_5\text{O}_{12}$ ).

De um modo geral as baterias de Li-ion, se usadas sem a devida monitorização e controlo durante a carga/descarga, podem ser perigosas, existindo risco de incêndio ou explosão (o lítio queima exposto ao ar e reage explosivamente com água (para formar hidrogénio) [67]). Poderá ainda existir o risco de curto-circuito interno, através de formação de dendrites [61]. Daí que seja necessário implementar sempre um sistema BMS (*Battery Management System*) ao usar este tipo de baterias.

Devido ao exposto, todas as baterias de li-ion incorporam (geralmente junto às células) dispositivos BMS que monitorizam a corrente da bateria, o estado da carga e a temperatura da bateria. Estes dispositivos interrompem o circuito quer em carga, quando a bateria já se encontrar carregada; quer em descarga, quando a bateria está na sua tensão mínima. Um destes sistemas pode ser observado na Figura 33b.



**Figura 33: a) Bateria Li-ion de computador portátil IBM Thinkpad, b) interior da mesma bateria onde se vê o BMS (folha de circuitos por cima das células) [68]**

Nos computadores portáteis, o sistema BMS completa-se com a interação de utilitários que estão disponíveis no *setup* e que possibilitam um ciclo de carga e descarga completo, atualizando assim as medições da bateria no sistema.

Uma equipa de investigadores da Universidade de Stanford [69] provou que, teoricamente uma bateria de lítio com ânodos de nano fios de silício, poderá ter uma energia específica de 1550Wh/kg, o que seria notável se fosse atingido.

A empresa Evonik Industries refere estar a desenvolver uma bateria de lítio-cerâmica que diz ser a maior do mundo. É uma bateria de electrólitos de lítio com uma membrana cerâmica. No futuro, o seu desenvolvimento promete armazenar energia, proveniente de fontes de energias renováveis, de forma eficiente e em grande escala. Segundo [29], a tecnologia patenteada pela Evonik também está no cerne de sua parceria com a Daimler AG, que visa a produção em massa de veículos elétricos a partir de 2012.

#### ***2.5.1.9 Lítio-polímero (Li-Po)***

Este tipo de baterias, são uma evolução das baterias de íões de lítio. A bateria Li-Po fornece correntes de pico (num curto espaço de tempo) elevadas, o seu tempo de vida pode ser bastante superior às baterias de NiCd ou NiMH (dependendo do tipo de uso). O seu rendimento de carga/descarga também é mais elevado do que estas.

Nas baterias Li-Po, geralmente o ânodo é feito de carbono ou grafite e o cátodo é feito de cobalto, manganês ou à base de lítio. O electrólito é feito de polímero em forma de filme. Este filme não conduz energia, mas permite a troca de íões. O facto de usar o electrólito no estado sólido elimina a obrigatoriedade de usar uma cápsula rígida para envolver a bateria (Figura 34). Isso permite que a bateria possa ter vários tipos de formas, sendo a maioria prismáticas.



**Figura 34 - Esquema de uma bateria LiPo [70]**

Tal como nas baterias de Li-ion, as baterias Li-Po necessitam de um carregador próprio. Se este for desadequado, pode causar danos irreparáveis nas células e o tempo de vida da bateria será francamente inferior ao esperado. Se for detetada alguma célula com o aspeto de inchada, a bateria deve ser imediatamente substituída. Nestas baterias, para além da perigosidade referida nas baterias de Li-ion, acresce o risco de uma perfuração acidental.

Quanto à reciclagem, as baterias Li-Po não apresentam problemas, apenas devem estar completamente descarregadas antes de serem recicladas [71]

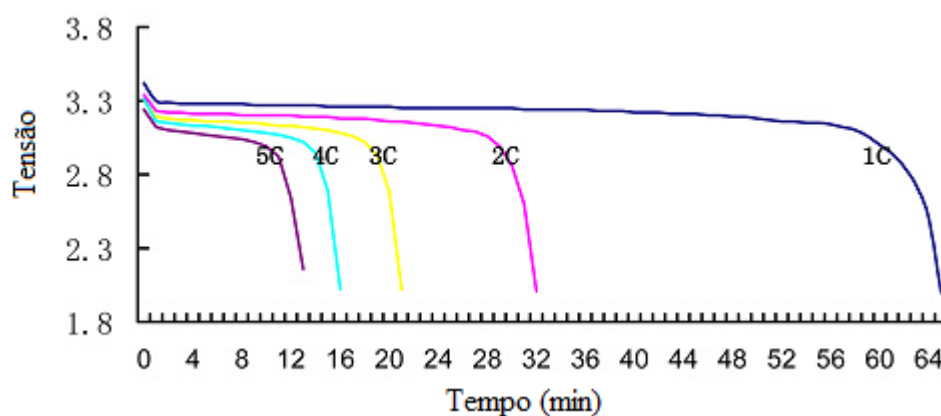
#### **2.5.1.10 Lítio-Fosfato de Ferro ( $\text{LiFePO}_4$ )**

É um tipo de baterias recente, foi descoberto em 1996 por John B. Goodenough [72], mas apenas começou a ser comercializado a partir de 2006.

Segundo [73] esta bateria possui um longo tempo de vida útil, baixa toxicidade, estabilidade térmica elevada, segura em termos de incêndio ou explosão e além disso o fosfato de ferro é um recurso abundante. A tecnologia  $\text{LiFePO}_4$  exibe uma boa energia específica (90 a 120Wh/kg) [53]. Por estes motivos esta bateria tem vindo a receber uma atenção crescente desde que começou a ser comercializada.

A tensão nominal das células  $\text{LiFePO}_4$  é de normalmente 3.3V. Estas baterias quase não apresentam autodescarga e também não possuem “efeito memória”. A sua profundidade de descarga

pode ir aos 100%, além disso a tensão nominal mantém-se praticamente constante durante quase todo o período de descarga, como se pode ver no gráfico da Figura 35.



**Figura 35 Características da descarga de uma bateria LiFePO<sub>4</sub> de 100Ah da marca Hipower, onde *C* é a capacidade nominal (ou taxa de descarga) [74]**

As LiFePO<sub>4</sub> oferecem uma tecnologia segura, não ardem nem explodem (apenas se deterioram) com sobrecargas e/ou com erros de carga e manipulação. Isso deve-se à incorporação de fosfatos como o material do cátodo. Os fosfatos são muito estáveis em condições de sobrecarga ou curto-circuito e têm a capacidade de suportar temperaturas elevadas sem decomposição.

Estas baterias podem durar mais de 2000 ciclos de vida e podem ser deixadas parcialmente descarregadas por longos períodos sem causar danos permanentes, embora se recomende a carga completa antes de armazenar.

A marca ThunderSky, produz uma ampla gama de capacidades deste tipo de baterias entre 40Ah e 1600Ah que se revela destinada a veículos elétricos. Mostra-se na Figura 36 algumas das formas que este tipo de baterias pode ter.



**Figura 36 - Exemplos de formas das baterias LiFePo<sub>4</sub>**

#### **2.5.1.11 Titanato de bário em cerâmica**

Segundo [75], a empresa EES<sub>tor</sub> registou a marca EESU (*Electrical Energy Storage Unit*) que se refere a uma bateria de titanato de bário em cerâmica. A bateria é supostamente de baixo custo, leve e de elevada densidade de energia, com uma excelente capacidade de descarga e terá um ciclo de vida longo.

A Zenn Motors tem um acordo de exclusividade para a construção dessas baterias, por notar que as suas propriedades são propícias para carros elétricos [75]. Segundo a mesma fonte, tudo isto pode ser especulação, mas é referido que em qualquer caso, a patente da marca *EESU* divulga especificações preliminares detalhadas para um modelo chamado de 24V-BDHD.

#### **2.5.1.12 Sódio-enxofre (Na-S) e sódio-cloreto de níquel (NaNiCl<sub>2</sub>)**

Os dois tipos mais comuns de baterias de alta temperatura são o sódio-enxofre e sódio-cloreto de níquel. Também são chamadas de baterias quentes, por necessitarem de uma temperatura de cerca de 300°C para que o eletrólito se torne bom condutor [61].

As investigações sobre a bateria Na-S remontam ao início dos anos 70. Estas baterias possuem uma boa densidade de potência, um longo ciclo de vida e custo moderado. Existem grandes aplicações estacionárias desta bateria, como uma aplicação que armazena cerca de 57,6MWh [66]



A bateria de sódio-cloreto de níquel ( $\text{NaNiCl}_2$ ) é muitas vezes apelidada de Zebra (nome comercial) e usa cloreto de níquel como material do eléctrodo positivo em vez do enxofre usado na Na-S [61].

#### **2.5.1.13 SCIB (*Super Charge Ion Battery*)**

A Toshiba apresentou uma nova tecnologia de baterias designada SCIB (*Super Charge Ion Battery*) [76] que adopta um novo material de eléctrodo negativo e que oferece um alto nível de estabilidade térmica. Esta tecnologia promete ciclos de carga e descarga superiores a 5000 vezes. Isto significa uma duração da bateria de cerca de 10 anos (usando um ciclo por dia). Uma outra característica é permitir carregamentos a 90% da capacidade em apenas cinco minutos [76]. Segundo a mesma fonte este tipo de bateria é ideal para aplicações de alta potência. Este tipo de bateria opera bem sob temperaturas extremas, com boa descarga a temperaturas muito baixas, na ordem do  $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$  o que resolve o problema de adaptação a climas frios.

#### **2.5.1.14 Zinco-prata (Zn-Ag)**

A bateria de zinco-prata, tem tido um papel importante em aplicações militares e espaciais. Também são usadas em câmaras de televisão [53]. Um elevado custo e uma vida útil curta, baniu este tipo de bateria para fora do mercado comercial, todavia com a evolução tecnológica poderá sempre surgir um renascimento.

Os primeiros eléctrodos (de zinco) e os separadores degradavam-se rapidamente e foram a principal causa de falha no projeto original. Além disso (tal como as NiZn) existe o problema da formação de dendrites de zinco que causam curto-circuitos internos. A vida útil estava limitada a cerca de dois anos.

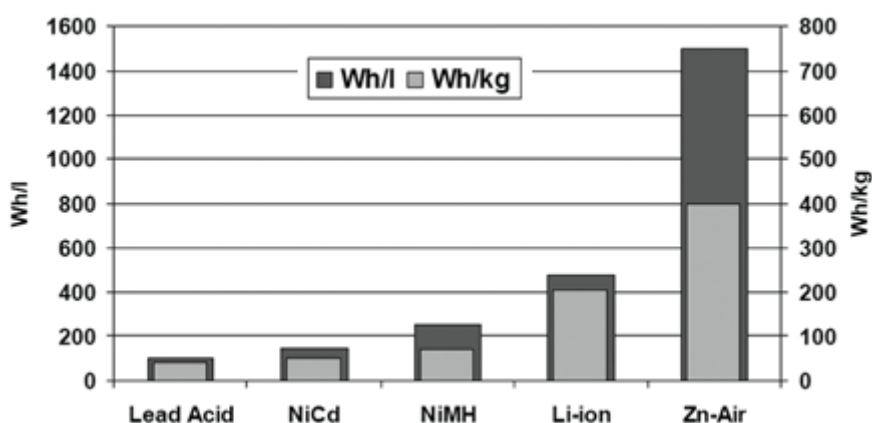
Novos desenvolvimentos nas melhorias do eléctrodo de zinco e separador, prometem uma vida útil mais longa e uma densidade energética específica 40 por cento superior às baterias de Li-ion.

As baterias de zinco-prata são seguras, não contêm metais tóxicos e podem ser recicladas, mas o uso da prata faz com que o preço desta bateria seja muito elevado.

### 2.5.1.15 Zinco-ar

As baterias zinco-ar existem nas formas primárias (descartáveis) e secundárias (recarregáveis). As primárias, são alcalinas, e são usadas como pilhas para relógios, calculadoras e aparelhos auditivos, entre outros.

As baterias recarregáveis de zinco-ar estão ainda em fase de desenvolvimento e têm como princípio de funcionamento a oxidação de zinco. O oxigénio provém da atmosfera (daí a bateria possuir vários orifícios na carcaça) e faz o papel do cátodo, liberando mais espaço no interior da bateria para o ânodo. Assim, com menores dimensões, a bateria consegue adquirir mais capacidade de armazenamento energético em relação a outros tipos de baterias como mostra a Figura 37.



**Figura 37 - Gráfico comparativo entre a densidade energética de baterias zinco-ar com outros tipos de baterias [77]**

Estas baterias, possuem uma elevada energia específica, entre 300 a 400Wh/kg [78]. A tensão nominal por célula é de 1,4 V. O custo de produção é baixo e a percentagem de autodescarga (em estado fechado) é bastante baixa, cerca de 1 a 2% por ano. Não possuem metais pesados, o que é bom para o meio ambiente.

Como inconvenientes, este tipo de baterias possui baixa taxa de descarga, são sensíveis a temperaturas extremas e humidade elevada.

A empresa Revolttechnology está a desenvolver uma tecnologia, assente nas baterias de zinco-ar ZFAB (*Zinc Flow Air Battery*) que, segundo diz, vai transformar o mercado global de soluções de energia

armazenada. Irá fornecer uma maior densidade de energia (até 3 vezes maior que a de íões de lítio), de baixo custo, segura e “verde” [79].

#### **2.5.1.16 Alumínio-ar (Al-air)**

As baterias Al-ar não são propriamente recarregáveis, uma vez que o ânodo de alumínio é consumido através da reação com o oxigénio atmosférico. No entanto, pode ser possível recarregar a bateria, mecanicamente com ânodos de alumínio novo [80].

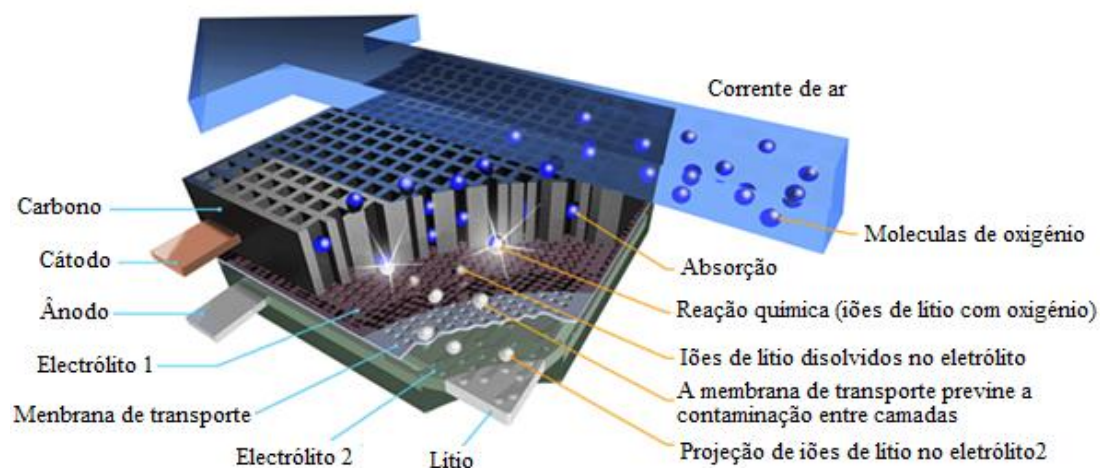
Esta tecnologia é recente e baseia-se na produção de eletricidade a partir da reação do alumínio com o oxigénio (presente no ar). A energia específica deste tipo de baterias pode ser de 380 a 455Wh/kg, ou seja, poderá ser mais de três vezes a capacidade das baterias de íões de lítio [81].

Segundo [82] esta tecnologia pode gerar potência e energia suficiente para uma utilização semelhante aos carros movidos a gasolina.

#### **2.5.1.17 Lítio-ar**

Muito recentemente foi anunciado pela IBM uma nova tecnologia de baterias que funcionam através da reação de lítio com ar, o projeto apelida-se de *Battery500*.

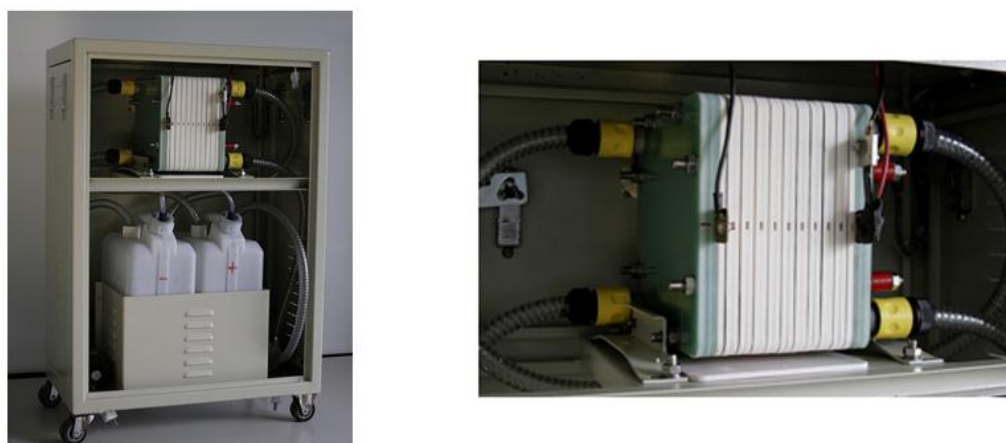
Segundo a IBM, ao descarregar-se a bateria, o oxigénio (existente no ar) reage com íões de lítio, numa matriz de carbono, formando peróxido de lítio. Durante a carga, o oxigénio é devolvido à atmosfera e o lítio regressa ao ânodo. A mesma marca prevê, com as suas novas baterias, um aumento da densidade energética de cerca de dez vezes em relação às baterias atuais de Lítio. O esquema desta tecnologia apresenta-se na Figura 38.



**Figura 38 – Esquema do projeto *Battery500* da IBM [83]**

### **2.5.1.18 Baterias de fluxo**

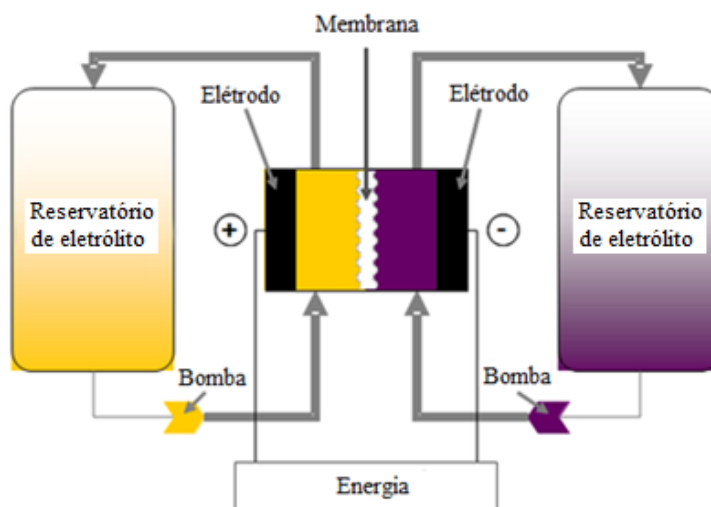
Em 1973 a NASA, tendo em vista o aumento da capacidade de armazenamento e a redução do tempo de carga, desenvolveu as baterias de fluxo. Uma bateria de fluxo é uma bateria com um reservatório exterior de eletrólito, como se pode ver na Figura 39. O fluxo dissolvido é geralmente bombeado (existem também sistemas que funcionam por gravidade). O eletrólito do reservatório poderá ser rapidamente substituído, numa estação abastecimento, por um outro já recarregado.



**Figura 39 – Instalação de uma bateria RFB [84]**

Existem várias famílias deste tipo de baterias, uma delas é a RFB, *redox flow battery* (*redox de reduction/oxidation*), onde todos os componentes ativos estão presentes na solução do eletrólito. A

quantidade de energia destas baterias está relacionada com a quantidade de fluido electrolítico armazenado no reservatório. O esquema de funcionamento pode ser analisado na Figura 40.



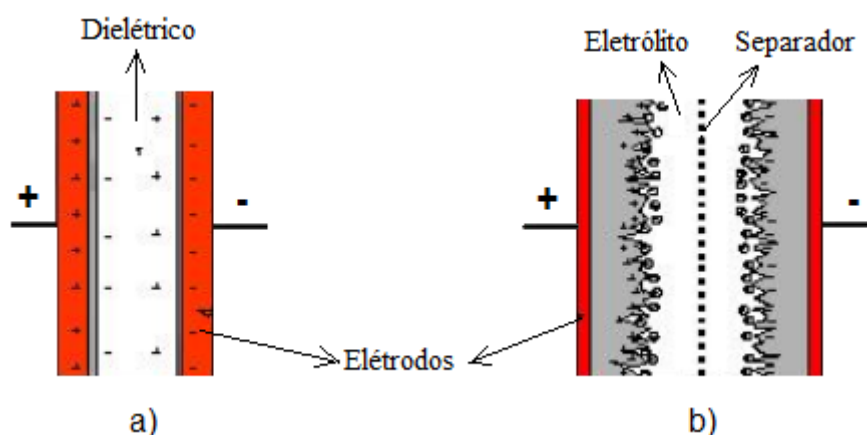
**Figura 40 - Princípio de funcionamento das baterias RFB [69]**

Segundo [85], existem outros tipos de baterias que usam a tecnologia de fluxo: *zinc bromine*, *iron–chromium*, *zinc–cerium*, *polysulphide bromide*, *vanadium–bromine*, *Al–vanadium*.

### **2.5.2 Ultracondensadores**

Os ultracondensadores, tal como os condensadores convencionais, armazenam energia através da polarização de placas isoladas por um separador, mas diferem destes por possuírem maior área de placas para o mesmo espaço. Num VE, os ultracondensadores permitem absorver picos de corrente e armazenar a energia da travagem regenerativa, mesmo com as baterias totalmente carregadas [86].

Esta tecnologia usa uma dupla camada de material poroso, o que promove uma área de superfície muito superior à dos condensadores comuns permitindo assim armazenar mais carga para o mesmo volume, como se mostra na Figura 41.



**Figura 41 – Esquema de comparação: a) condensador tradicional, b) ultracondensador [87]**

Esse material poroso pode ser substituído por nano tubos de carbono, aumentando ainda mais a área de polarização, tornando-a muito mais uniforme, favorecendo assim a distribuição das cargas. Segundo a fonte [88] os condensadores com nano tubos de carbono, armazenam cerca de dez vezes mais energia que as melhores baterias atuais e podem ser recarregados em minutos. Por enquanto estes supercondensadores não são economicamente viáveis por causa do preço do fabrico dos nano tubos.

### 2.5.3 Células de combustível (*Fuel Cell*)

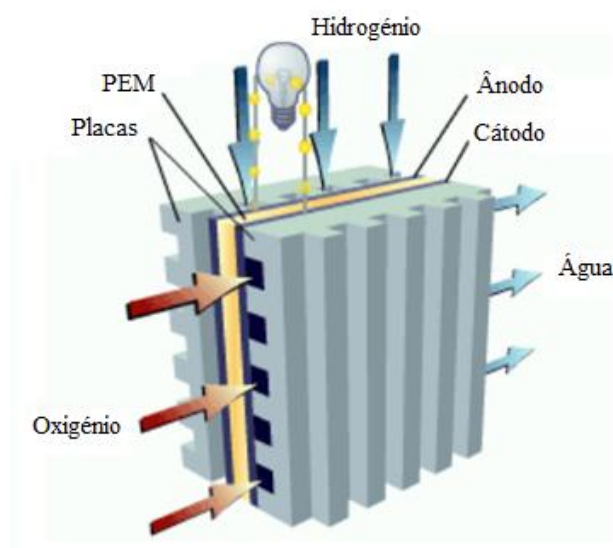
A célula de combustível foi inventada em 1839 por Robert Grove [89] e nas décadas seguintes o conceito foi desenvolvido por outros investigadores. Em 1968 a marca AFC (*Apollo Fuel Cell*) desenvolveu as células adoptadas pelo programa espacial Apollo.

Segundo Martins *et al.* [6], uma célula de combustível básica é alimentada por um combustível (geralmente hidrogénio) e oxigénio, que produz diretamente uma corrente elétrica por um processo eletroquímico. Um gerador electroquímico de energia que tem um funcionamento similar ao da electrólise da água, mas em sentido inverso. A reação da célula de combustível liberta calor e água. O combustível é armazenado num depósito pressurizado e o oxigénio é retirado do ar ambiente.

Nestas células, pode ser usado o hidrogénio como combustível, ou pode ser usado metanol para obtenção do hidrogénio. Este último processo denominado DMFC (*Direct Methanol Fuel Cell*), além do calor e água, liberta também algum dióxido de carbono. O metanol é mais fácil de transportar e possui maior densidade energética do que o hidrogénio [90]. O hidrogénio necessita ser comprimido a

pressões muito elevadas (entre 350 e 700bar) para poder ocupar pouco espaço, o que torna o processo e o armazenamento bastante dispendiosos [6].

A tecnologia PEM (*Proton Exchange Membrane*) também designada por PEMFC (*Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cell*) usa um electrodo feito de um polímero orgânico, que permite o transporte de protões (retendo os eletrões) através dessa membrana, na presença de uma solução de água [91].



**Figura 42 – Esquema de funcionamento de uma célula típica de combustível PEM [92]**

O rendimento do processo de conversão da energia do combustível em energia elétrica é geralmente bastante superior ao dos motores a combustão [6]. Como desvantagens, a célula PEM tem como limitações os custos de produção elevados, bem como um sistema complexo de gestão da quantidade de humidade. A tecnologia requer hidrogénio puro, caso contrário pode provocar a deterioração e entupimento da membrana.

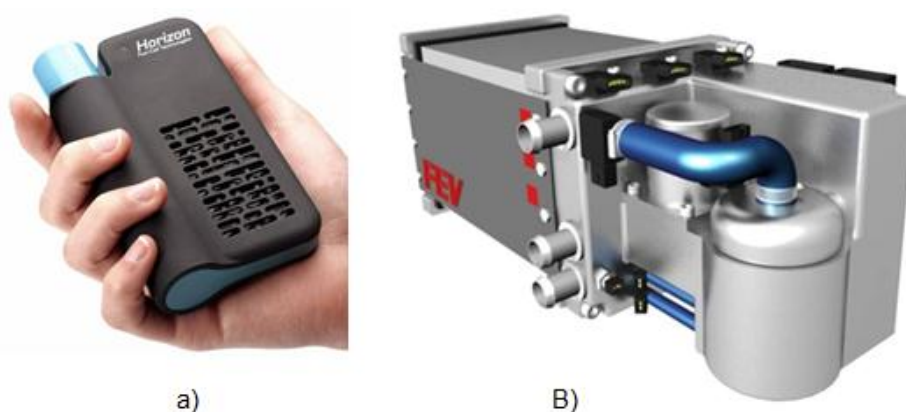
Existem outras variantes da célula de combustível, para além das já descritas, tais como: AFC (*Alkaline Fuel Cell*), PAFC (*Phosphoric Acid Fuel Cell*), MCFC (*Molten Carbonate Fuel Cell*), SOFC (*Solid Oxide Fuel Cell*). A Tabela 3, compara algumas características destes tipos de células.

**Tabela 3 - Características das principais células de combustível [93]**

Tipo	Temperatura de funcionamento (°C)	Rendimento (%)	Dimensão típica
<b>PEM</b>	80 (típica)	35 - 60	1 – 10kW
<b>AFC</b>	90 - 120	60	10 – 100kW
<b>PAFC</b>	150 - 200	40	100 – 400kW
<b>MCFC</b>	600 - 700	45 - 50	300kW – 3MW
<b>SOFC</b>	700 - 1000	60	1kW – 2MW

De notar que existem duas categorias distintas de células de combustível, as de baixa temperatura (PEM, AFC e PAFC) e as de alta temperatura (MCFC e SOFC).

Por curiosidade, a empresa Americana Horizon dispõe de pequenas células de combustível PEM de 10W até 5kW. As empresas Sony e Toshiba, têm micro células de combustível (metanol puro) com reabastecimento por cartuchos, para recarregar baterias de pequenos aparelhos electrónicos. Na figura Figura 43 mostra-se dois exemplos de células de combustível.



**Figura 43 - a) Micro FC da marca Horizon [94], c) FC da empresa ZBT de 30kW com arrefecimento a água, para veículos [95]**

#### **2.5.4 Sistemas mecânicos de armazenamento de energia**

Para além das baterias, existem outros tipos de armazenamento de energia, são menos conhecidos, alguns por terem um rendimento baixo, outros por terem custos elevados, ou por serem

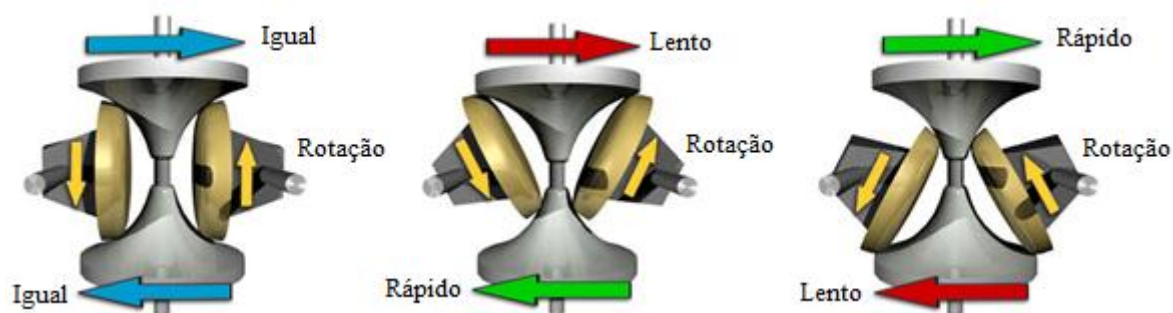


muito complexos e ainda não estarem suficientemente desenvolvidos para implementação massiva. Aborda-se de seguida este tema.

#### **2.5.4.1 Recuperação de Energia Cinética (KERS)**

O conceito KERS (*Kinetic Energy Recovery Systems*), visa acumular a energia das desacelerações ou descidas e reintroduzi-la nas acelerações ou subidas. Consiste num volante de inércia (*flywheel*) que armazena essa energia e posteriormente, quando necessária, é novamente transferida para as rodas motrizes.

O sistema pode contemplar um motor-gerador (acoplado ao volante de inércia), e ultracondensadores para o armazenamento elétrico, pode simplesmente reutilizar a energia do volante de inércia transferindo essa energia para a tração do veículo, diminuindo assim as perdas. Geralmente o volante de inércia está acoplado a uma transmissão, que pode ser uma CVT toroidal por fricção, como se ilustra na Figura 44.

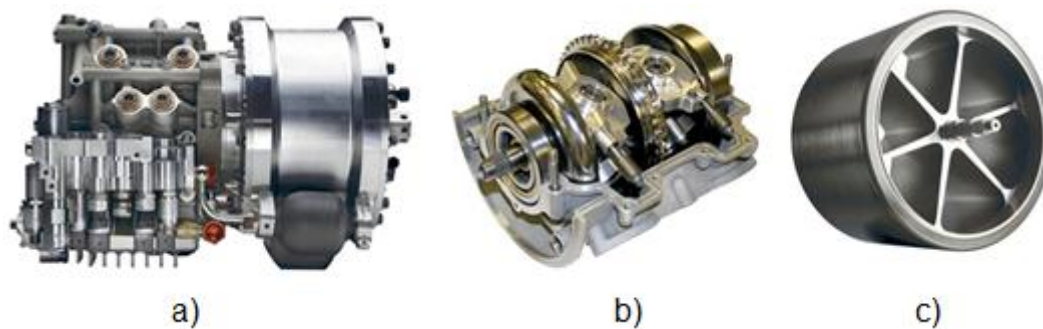


**Figura 44 - Esquema de uma CVT toroidal [96]**

Segundo [97] a empresa Flybrid possui um volante de inércia, feito em aço envolto em camadas de fibra de carbono (para não se desintegrar) com uma massa de 5kg, diâmetro de 200mm, e pode atingir uma rotação máxima de 60 000rpm. A elevada rotação é a forma encontrada de armazenar uma grande quantidade de energia tendo um volante com pouca massa.

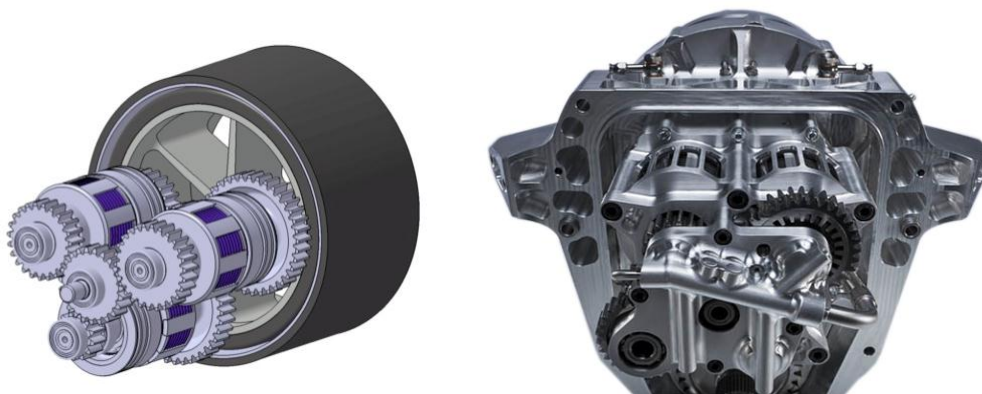
O sistema da Flybrid, que se mostra na Figura 45, foi usado nos carros da Formula1, atinge uma velocidade linear de Mach 2, roda em vácuo (por causa do atrito com o ar) possui uma vedação especial patenteada pela marca. Os rolamentos estão fora da zona de vácuo para permitir o

arrefecimento e lubrificação (pois gera muito calor). O controlo da CVT toroidal é muito sensível. Segundo [98] pode ter uma capacidade para armazenar cerca de 60kW.



**Figura 45 – a) Sistema KERS da Flybrid, b) pormenor da CVT toroidal da Xtrac, c) volante de inércia [97] [99]**

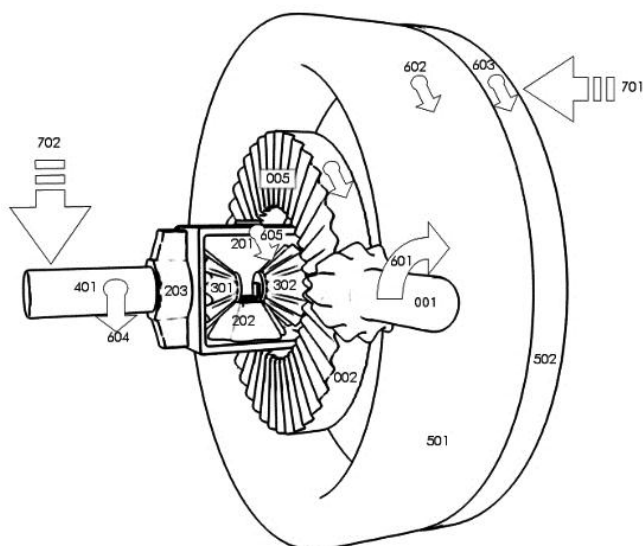
Existe uma outra tecnologia CFT (*Clutched Flywheel Transmission*) desenvolvida em torno do sistema KERS como se mostra na Figura 46. Segundo [100] esta tecnologia pode vir a ser implementada em carros do dia-a-dia. O CFT é um género de caixa automática com três velocidades e embraiagem por escorregamento que permite multiplicar o número de velocidades existentes no carro pelo número de velocidades do CFT, assim o sistema fica com uma ampla gama de velocidades de atuação entre o volante de inércia e as rodas do veículo.



**Figura 46 - Sistema KERS com CFT [101]**

Um outro dispositivo, segundo a patente número GB0813194.8 (U.K.), compreende um sistema de engrenagens planetárias para uso em veículos. A energia do motor pode ser enviada, de forma

seletiva, para as rodas ou para o volante de inércia ou para ambos, e recuperada posteriormente, através de uma embraiagem que faz o acoplamento do volante ao eixo de ligação à roda motriz. A Figura 47 revela o esquema. A legenda não é mostrada por ser bastante extensa, mas poderá ser consultada através da referência [102].



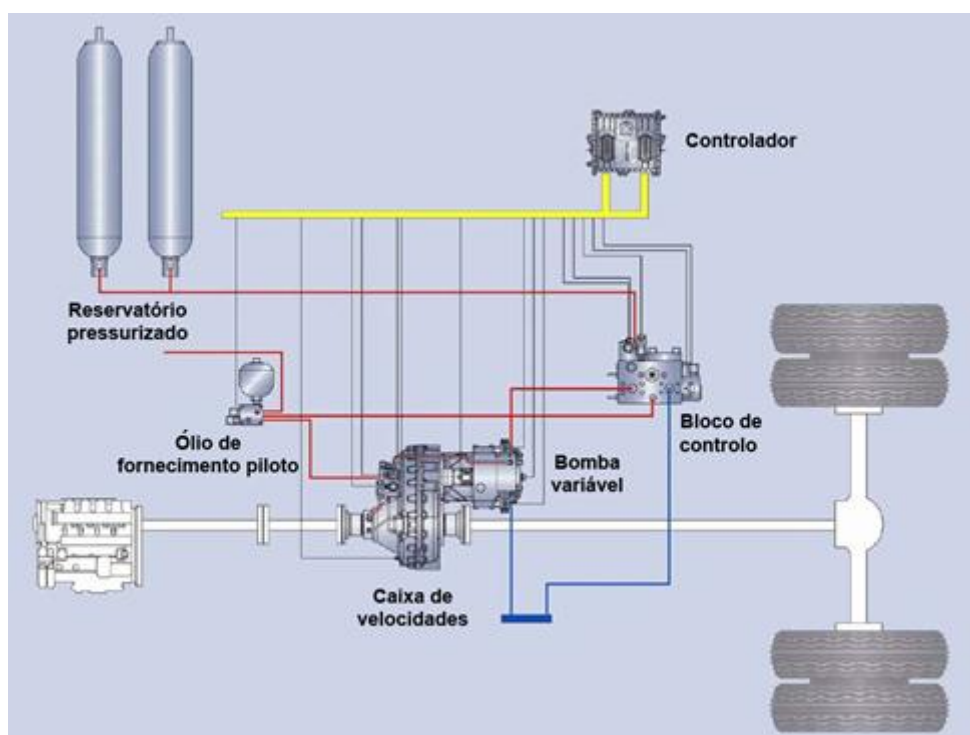
**Figura 47 - Esquema da patente do CPC-KERS, [102]**

Em resumo, os principais obstáculos ao desenvolvimento e aplicação do sistema *KERS* em automóveis, devem-se ao atrito, à sensibilidade a choques, à resistência dos materiais à força centrífuga, ao preço, à instabilidade do veículo devido ao efeito de giroscópio e ao ruído. A segurança é outro problema, segundo [103] durante um teste de um volante de inércia (propositadamente planeado para falhar), um acidente provocou a morte de um engenheiro alemão e ferimentos noutros dois.

Por curiosidade, a Ford incorporou um sistema KERS no seu protótipo híbrido (Synergy 2010), que funciona com um pequeno motor a gasolina (que alimenta um gerador) e quatro motores elétricos de ímanes permanentes (um por roda). A Volvo Powertrain em conjunto com a SKF, também tem um projeto para desenvolvimento de um sistema KERS que segundo [104] será um dos primeiros fabricantes a testar esta tecnologia em estradas públicas.

#### 2.5.4.2 Sistema hidráulico (HRB, HPA)

O sistema HRB (*hydraulic regenerative brake*) consiste em utilizar a energia da travagem regenerativa para bombear um fluido de um reservatório de baixa pressão para um outro de alta pressão. Como o fluido hidráulico é incompressível, a pressão é criada por um gás (azoto) previamente colocado nesse depósito dentro de uma balão ou bexiga. Quando for necessário acelerar o veículo, o processo inverte-se e a bomba passa a motor hidráulico, auxiliando assim o motor de combustão interna. O departamento de saneamento de Nova Iorque (DSNY) está a testar um sistema HRB nos seus camiões de transporte e recolha de lixo. O sistema foi fornecido pela Bosch Rexroth Corporation [105] e com ele pretende-se avaliar a confiabilidade e a economia de combustível. Mostra-se na Figura 48 o esquema desse sistema.



**Figura 48 - Esquema do sistema HRB da Bosch Rexroth [105]**

A Ford Motor está a desenvolver um sistema com esta tecnologia e apelida-o de HPA (*Hydraulic Power Assist*). Segundo [106] com este sistema estima-se uma recuperação de energia (da travagem regenerativa) na ordem dos 80%.

Os sistemas HRB têm sido usados apenas em protótipos, pois apresentam problemas com fugas, são muito ruidosos e os reservatórios ocupam bastante espaço. Todavia poderão ser usados em

veículos pesados de transporte. Por curiosidade, em 1968 a empresa Hybrid-Drive Systems instalou um sistema destes num carro Volkswagen.

#### **2.5.4.3 CAT (Compressed Air Technology)**

O sistema CAT é constituído por um motor a pistão movido pela expansão de ar comprimido. Este sistema foi desenvolvido por Guy Negre através da sua empresa MDI (*Moteur Developpment International*) fundada em 1991. O sistema contempla dois modos de funcionamento o *mono-énergie* e o *bi-énergie*. No modo *mono-énergie* o ar comprimido é expandido num cilindro e poderá ter uma autonomia de cerca de 100km. No modo *bi-énergie*, antes de se expandir o ar comprimido, este passa numa câmara de combustão externa onde é injetado algum combustível, para aquecimento e aumento do volume, sendo depois expandido no cilindro. A combustão é contínua e não depende dos ciclos do motor. Neste modo de funcionamento a autonomia pode chegar aos 800km [107].

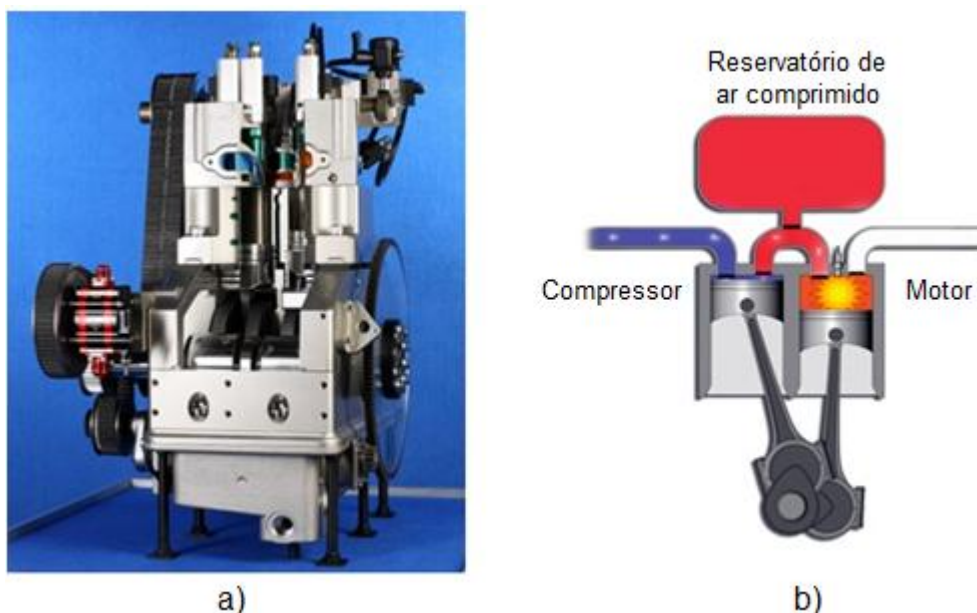
Os reservatórios são construídos em fibra de carbono e podem ser cheios com ar comprimido até à pressão de 300 bar. O abastecimento de ar pode ser feito num posto de combustível, demorando apenas cerca de três minutos. O carro poderá ser equipado com um compressor, acionado por um motor elétrico, que pode ser ligado a uma tomada da rede eléctrica, para encher o reservatório. Segundo [107] esta operação demorará cerca de quatro horas

A MDI assinou um acordo com a Tata Motors, para desenvolvimento e aplicação desta tecnologia nos carros Indianos [108].

#### **2.5.4.4 Air-Hybrid Engine**

Um outro conceito *Air-Hybrid Engine* usa um misto de motor a expansão de ar comprimido, e um motor a combustão, do tipo “*split cycle*” com uma câmara de compressão e outra de combustão/expansão, como se pode ver na Figura 49. Segundo [109] em modo de funcionamento normal (motor a combustão), o ar proveniente do cilindro compressor é armazenado num reservatório que o disponibiliza para ser utilizado na combustão do cilindro motor.

Para armazenar energia da travagem regenerativa fecha-se a válvula de admissão da câmara de combustão e o ar é comprimido para o reservatório. Este ar é usado mais tarde em modo de motor a ar comprimido.



**Figura 49 - Esquema do motor Air-Hybrid [109]**

Este sistema é recente foi inventado em 1994 pelo engenheiro (depois de aposentado) Carmelo Scuderi. O grupo Scuderi diz que, quando o sistema estiver totalmente desenvolvido, o motor será capaz de melhorar o rendimento em 50% e reduzir as emissões de NOx até 80% em comparação com motores a gasolina convencionais.

## **2.6 Transmissão mecânica**

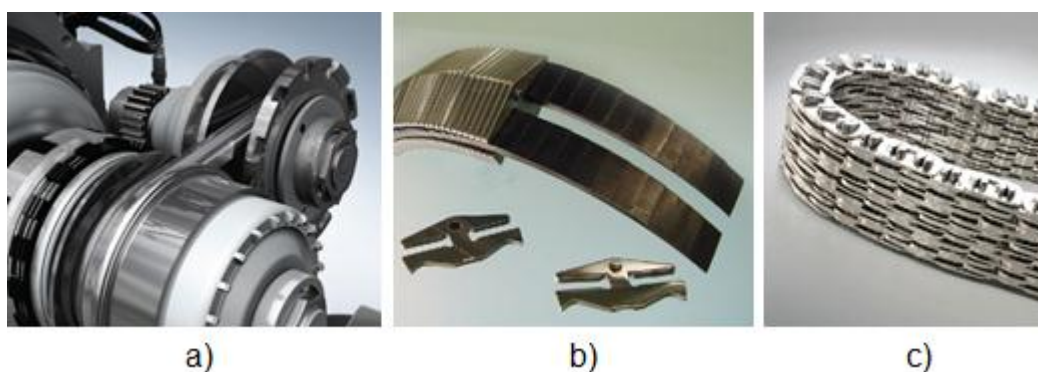
Apesar dos motores elétricos operarem numa larga gama de velocidades e possuírem um forte binário desde o arranque, em muitos veículos elétricos é usada uma caixa redutora, conferindo maior binário às rodas motrizes. A relação de transmissão pode ser calculada de forma que a velocidade máxima do motor corresponda à velocidade máxima do veículo, garantindo assim que o aumento de binário não penalize a velocidade de ponta.

Os motores elétricos têm uma zona de funcionamento (velocidade e binário) onde o seu rendimento é melhor. Uma relação de transmissão variável, projetada em função do tipo de utilização, faria com que o motor rodasse mais tempo nessa zona. No entanto uma caixa de velocidades representa um acréscimo de custo e despesas de manutenção, que pode não ter retorno. Segundo

[110] uma transmissão de duas velocidades poderá reduzir entre 5 a 10% do consumo de um carro elétrico.

Um dos tipos de transmissão que se afigura apropriado para veículos elétricos é o CVT (de correia metálica ou de corrente). Esta transmissão já usada em veículos híbridos, por ter uma variação contínua, e não necessitar de desacoplamento (embraiagem), pode ser usada em veículos elétricos. O sistema consiste em duas polias de pratos móveis, que deslizam ao longo do seu próprio eixo variando o diâmetro (onde a correia atua), fazendo assim variar a velocidade. No veio primário, a polia é acionada por um sistema hidráulico ou por um mecanismo que atua conforme a rotação do motor. No veio secundário a polia é geralmente atuada por uma mola. Este sistema é vulgarmente usado nas *scooters*, com uma correia em borracha com filamentos de nylon ou aço.

Para os automóveis, como as potências são mais elevadas, a correia passou a ser integralmente em aço e o sistema passou a ser lubrificado. Também foi desenvolvido um sistema por corrente para CVT, como se mostra na Figura 50c.



**Figura 50 – a) VDT (*Van Doorne Transmissions*) [111], b) correia em aço Honda [112], c) corrente metálica LUK [113]**

Um outro tipo de transmissão foi desenvolvido pela empresa Zeroshift [114], que teve em vista a aplicação em automóveis de competição e automóveis elétricos, e passa por uma caixa com duas ou mais velocidades. Segundo a empresa, a mudança de relação é instantânea e não interrompe o binário entre o motor e as rodas. Refere ainda que o seu sistema tem um fabrico mais económico do que um CVT.

Os componentes básicos da Zeroshift são dois anéis de acionamento com dois pequenos garfos e rodas dentadas (Figura 51b). Possui um sistema de amortecimento de binário (no cubo da própria roda



dentada) que dispensa embraiagem. A mesma fonte diz que a sua caixa de velocidades praticamente não acarreta perdas no rendimento.



**Figura 51 – a) caixa de velocidades Xtrac usada na competição automóvel [115], b) sistema Zeroshift [116]**

### **2.6.1 Rendimento de elementos de transmissão**

As transmissões têm perdas nos seus elementos, que podem ser originadas por atrito entre superfícies, escorregamento entre correias e polias, atrito e escorregamento entre rodas dentadas, atrito de rolamentos, agitação do óleo lubrificante, etc. A Tabela 4 mostra os rendimentos de alguns desses componentes.



**Tabela 4 -Valores típicos de rendimento para elementos de transmissão mecânica [117]**

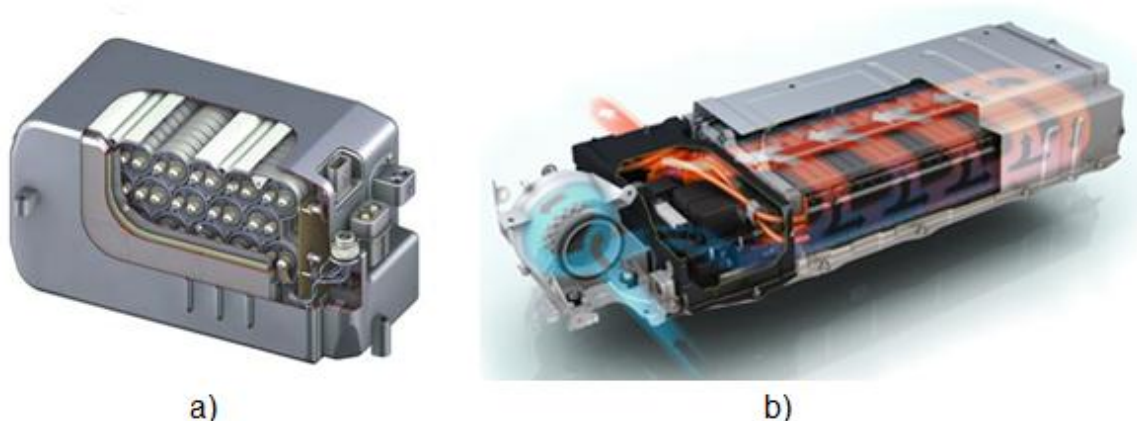
Tipo		$\eta$
Correias planas		0,98 - 0,99
Correias em V		0,95
Correias dentadas		0,98
CVT de correia em V		0,8 - 0,9
CVT de corrente metálica		0,96 - 0,98
Rodas dentadas helicoidais		0,98
Redutor sem-fim	1/10	0,86
	1/25	0,82
	1/60	0,66
Redutor helicoidal	1 andar	0,98
	2 andares	0,96
Correntes de rolos		0,98
Rodas de atrito		0,95 - 0,98
Rosca sem fim 1 entrada		0,45 - 0,60
Chumaceiras de deslizamento (par)		0,96 - 0,98
Chumaceiras de rolamentos (par)		0,98 - 0,99
Acoplamento flexível		>0,99

## 2.7 Carregamento das baterias

As baterias de veículos elétricos têm de ser carregadas com corrente contínua. Como a rede fornece corrente alternada, e com uma tensão diferente da das baterias, então um carregador tem de ser também conversor de tensão. Existem vários modos de carga que serão abordados mais à frente na secção 2.7.2.1.

O carregador geralmente vem integrado no próprio sistema do veículo elétrico e a carga pode ser feita durante a noite beneficiando assim o utilizador de uma tarifa mais económica. Uma carga lenta poderá demorar cerca de 8 horas. A carga rápida é vital para não se perder muito tempo durante uma deslocação, no entanto quanto mais rápida for a carga, menor poderá ser o tempo de vida das baterias, conforme a sua tecnologia.

Quanto mais rápida for a carga, mais quantidade de calor se produz nas baterias (conforme a sua capacidade). Esse calor degrada a bateria e reduz o seu tempo de vida útil [118]. Algumas baterias possuem sistemas de arrefecimento de forma a mitigar o problema das cargas rápidas (usado também nas descargas), a Figura 52 mostra um destes sistemas.



**Figura 52 – a) Bateria do Mercedes S400 BlueHYBRID [118], b) Bateria do Toyota Prius [119]**

No sistema da Figura 52a bateria é arrefecida com o sistema de ar condicionado do carro, através de um evaporador (em forma placa) colocado junto às baterias. O sistema da Toyota Prius (Figura 52b) funciona por ar ventilado.

Pelo contrário, pode acontecer que a bateria esteja relativamente fria, sobretudo no inverno e/ou durante os primeiros quilómetros de arranque do veículo, afetando o rendimento da bateria. Para atenuar isso, o motociclo EV-neo da Honda possui um sistema que atua quando a bateria se encontra fria. Abaixo de uma determinada temperatura, o controlador do motor passa a funcionar em modo limitado, diminuindo a aceleração do motociclo até que a bateria aqueça (com a descarga provocada pelo funcionamento do motor). Se a temperatura da bateria aquecer acima de um nível definido, liga-se um ventilador que força a entrada de ar para a caixa da bateria arrefecendo-a [120].

### **2.7.1 Conectores**

Atualmente, na Europa, muitos dos condutores de veículos elétricos têm de possuir vários tipos de cabos para se poderem ligar nos diferentes postos de abastecimento, já de si raros em muitas

localidades. Existe uma grande variedade de tipos de conectores (como se pode observar na Figura 53).



**Figura 53 – Sistemas de ligação a veículos elétricos, e respectivas normas, protocolos (CHAdeMO) ou alianças comerciais (Alliance) [121] [122] [123] [124] [125] [126] [127]**

CHAdeMO é um protocolo de comunicação de dados e potência para carregamento rápido. A Alliance tal como o nome indica, é uma aliança de cooperação comercial entre as marcas Legrand,

SCAME e Schneider. O Combo1 é composto por duas tomadas: uma tomada SAE J1772 (na parte superior) e uma outra para carga rápida de corrente contínua (na parte inferior). A Combo2 é composta por uma tomada Mennekes e uma outra para carga rápida.

Na Europa a norma IEC-62196-2 estabelece três tipos de conectores: um para ligação ao veículo, do tipo Yazaki (SAE J1772) monofásico; e dois para ligação à estação de carregamento, dos quais um do tipo VDE-AR-E2623 (Mennekes), sem tampa obturadora e outro do tipo Alliance com tampa obturadora, ambos monofásicas ou trifásicos [128]. Em Portugal nos postos MOBI.E são usados os conectores tipo SCAME (IEC 309-2) e o Mennekes (IEC 62196).

Muitos destes conectores para além dos pinos de potência e ligação à terra, usam também pinos de comunicação e controlo, e um pino de proximidade (por questões de segurança) que indica que a tomada está inserida. Possuem ainda um pino de bloqueio que impede que sejam retirados durante o processo de carregamento.

### **2.7.2 Postos de Carga**

Portugal foi um dos países pioneiros em soluções inovadoras para postos de carga. A empresa Portuguesa de gestão dos postos de carga, definida por MOBI.E [129], conta com cerca de 1300 postos de carregamento normal e 50 postos de carregamento rápido. O Grupo Petrotec, anunciou que pretende lançar, ainda este ano, um novo posto rápido de carregamento para veículos eléctricos, denominado PFast. O PFast cumpre o protocolo CHAdeMO e demora cerca de 20 a 30 minutos para carregar 80% do SoC das baterias [130].

Um pouco por todo o mundo industrializado, têm sido instalados postos de carga para carros eléctricos. Chabot [131] refere algumas das seguintes marcas de postos: POD Point (Londres); Temper-Cardylet (Asturias); Circutor-RVE, Merlyn-Emerix (Espanha); EDF (França); Better Place, 365 Energy group, Aerovironmen (USA); Eldon (Suécia); RWE, E-ON (Alemanha); Lemnet (Suiça); Tepco (Japão); Epyon (Holanda). Na Figura 54 mostram-se alguns exemplos destes postos para carregamento das baterias dos veículos eléctricos.



**Figura 54 - Exemplos de postos de carga: a) POD Point, Londres [132]; b) USA [133]; c) AeroVironment, USA [134]; d) MOBI E, Portugal [135]; e) Epyon, Holanda [136]; f) TEPCO (Tokyo Electric Power Co.) Japão [137]**

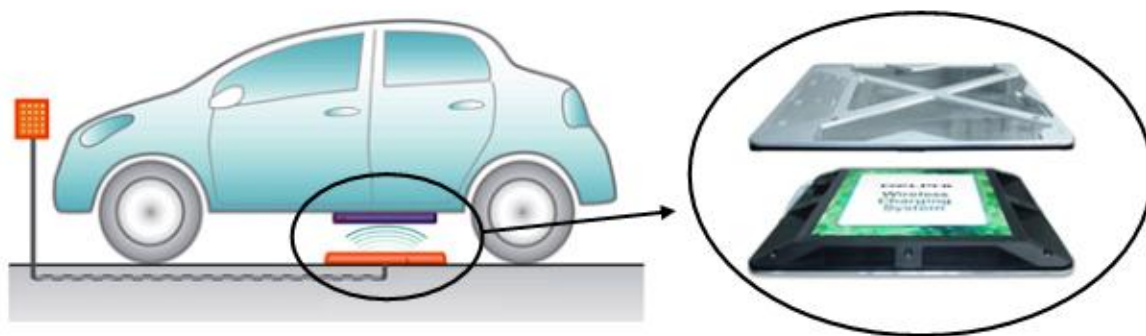
A carga das baterias dos veículos elétricos vem alterar todo o conceito atual de redes de energia. A primeira impressão é que os VE's vem sobrecarregar a rede elétrica atual, no entanto, uma boa gestão da carga de baterias dos veículos elétricos pode tornar o parque eólico nacional mais rentável. O pico de energia produzida pelos aerogeradores ocorre muitas vezes durante a noite, quando a rede menos necessita, essa energia pode ser vendida para o abastecimento das baterias dos carros elétricos. O utilizador pode poupar usufruindo de uma tarifa noturna, além disso evita-se que a rede seja sobrecarregada durante o dia. Certamente quando a rede elétrica foi projetada não era espetável uma difusão, em larga escala, deste tipo de veículos. No entanto os conceitos de smart charging e smart grids poderão minimizar estes impactos negativos [138] [139].

Existem aplicações para *Smartphones*, como a aplicação MOBI.E para o sistema operativo Android, é gratuita e permite consultar em tempo real, através de um *Smartphone*, a disponibilidade mais próxima dos pontos de carregamento de baterias de veículos elétricos, bem como saber se estes estão ocupados ou livres [140]. Uma outra aplicação, a Chargelocator (desenvolvida em Espanha) pode ser instalada no sistema operativo Android e iPhone e permite obter informação acerca dos postos de carga instalados na península ibérica. [141]

O veículo também pode ser carregado por indução. Este tipo de carregadores, já é utilizado para carregar telemóveis, que se pousam sobre uma placa sem qualquer ligação de cabos. Para VE's existe um sistema de carga, o Magna Charge que possui uma placa indutora na ponta do cabo, em vez do

conector, de forma a ser colocada numa ranhura receptora do veículo sem que exista qualquer contacto elétrico. A ideia visa proteger as pessoas de possíveis choques elétricos.

Existe outro tipo de carregadores colocados no pavimento do local de estacionamento (por indução como mostra a Figura 55), ou em forma de tapete. Ambos permitem carregar o carro, sem fios e em parques de estacionamento. A Siemens em cooperação com a BMW está a desenvolver um projeto deste tipo. A Volvo estima carregar o seu C30 elétrico, com um sistema de indução, em aproximadamente 80 minutos.

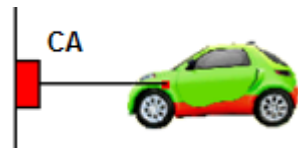


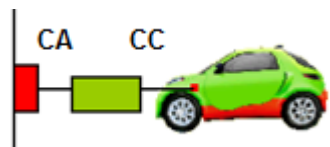


**Figura 55 – Sistema de carga por indução da Delphi [142]**

### ***2.7.2.1 Modos de carga***

Existem quatro modos distintos de carga (segundo a norma europeia IEC-6296) que podem ser efectuados num veículo elétrico. Cada um obedece a uma dada tensão, corrente e tempo necessário à carga da bateria. A Tabela 5 faz uma abordagem geral às características desses modos de carga.

**Tabela 5 – Modos de carga definidos pela norma IEC-62196-1 [143] [144]**

Modo de carga	Corrente (A)		Tipo carga e esquema de ligação	Tipo de ligação	
1	Monofásico	16	Carga lenta, com cabos estandardizados de habitação doméstica		A, B
	Trifásico				
2	Monofásico	32	Carga lenta com proteção de segurança no cabo		B
	Trifásico				
3	Monofásico	32	Carga lenta ou rápida, com controlo e proteção na instalação		A, B, C
	Trifásico	250			C
4	Monofásico	400	Carregador externo		C
	Trifásico				

**CA** – Corrente alternada

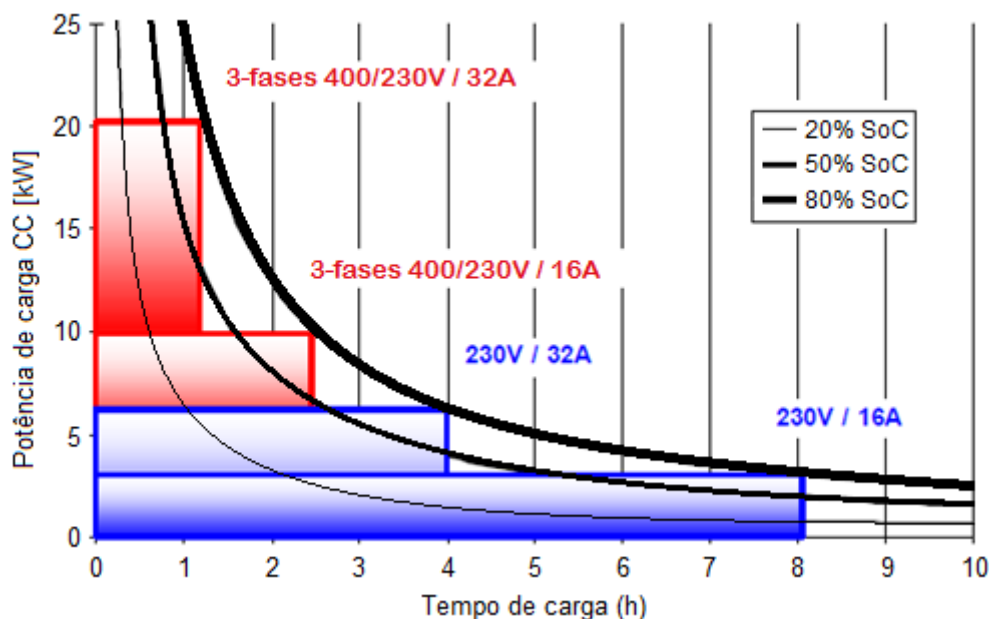
**CC** – Corrente contínua

A – Cabo com ligação permanente ao VE

B – Cabo com ligação não permanente ao VE

C – Cabo ligado permanentemente à estação de carregamento

O condutor de um veículo elétrico poderá optar por um modo de carga que lhe seja mais favorável, tendo em conta o tempo de que dispõe e o estado de carga (SoC) que lhe garante percorrer o resto da viagem. A Figura 56 relaciona o tempo de carga, a percentagem do estado de carga das baterias, o modo de carga e a potência que é fornecida à bateria.



**Figura 56 – Relação entre o tempo e o estado de carga SoC, consoante o modo de carga, para uma bateria de elevada energia [145]**

Com estes dados pode estimar-se o estado de carga de uma bateria em função do tempo disponível para a recarregar, ou vice-versa, tendo em conta as características do fornecimento de energia.

Nos estados unidos da América são usados 3 níveis de carga (em vez dos 4 modos europeus) [146]. Estes níveis são descritos em várias fontes, mas essas descrições nem sempre são convergentes, no entanto com base em [147], faz-se uma abordagem ao assunto.

O nível 1 usa 110 ou 120V CA, saída monofásica, possui três pinos, dois para a tensão e um para ligação à terra. A carga pode demorar de 8 a 14 horas. Esta tensão (110V) é comum na rede doméstica dos EUA.

O nível 2 usa 220 ou 230 volt CA, monofásica e a carga pode demorar de 4 a 8 horas, dependendo do tipo de baterias usadas no veículo.

Nos carregadores de nível 3, ou carregamento rápido, a transformação da tensão é feita no posto de abastecimento. O posto usa a entrada da rede, trifásica com tensão de 480V, CA, e à saída (disponível ao utilizador) tem-se 300 a 400V CC. Este carregamento exige uma corrente muito elevada e pode efetuar uma carga muito rápida (cerca de 15 minutos até 80% da carga da bateria). Neste



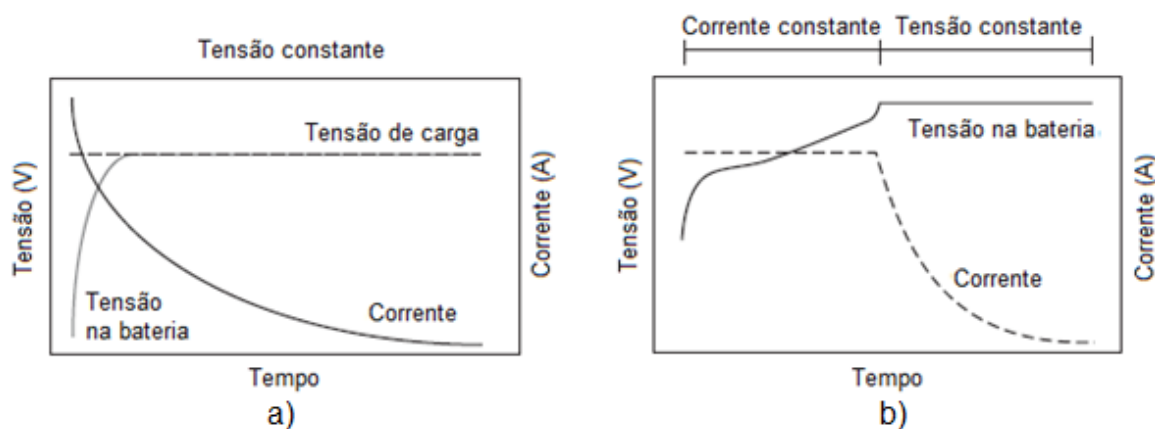
processo produz-se uma grande quantidade de calor que tem de ser dissipado. A Tabela 6 faz um resumo das condições destes níveis de carga.

**Tabela 6 - Níveis de carga e tipos de conectores mais usados, norma americana [146] [147]**

Nível	Tensão (V)	Corrente (A)	Potência (kW)	Tempo de carga (h)	Tipo de conector
I	110 a 120 CA	$\leq 16$	$\leq 2$	8 a 14	SAE J1772
II	208 a 240 CA	$\leq 80$	$\leq 20$	4 a 8	SAE J1772
III	Entrada 480 CA Saída 300 a 400 CC	125 a 400	60 a 90	<15 minutos	SAE Combo1

### 2.7.2.2 Métodos de carga

Existem vários métodos de carga, de acordo com o tipo de bateria, onde se manipulam as variáveis tensão, corrente e tempo. A carga efetuada com tensão constante (Figura 57a) é típica de um carregador que possui um transformador e uma ponte rectificadora. Este tipo de carregador é vulgarmente usado em cargas lentas em baterias de chumbo-ácido [61]. A carga combinada (corrente constante/ tensão constante) é feita através de carregadores com controlo de tensão e corrente. Estes carregadores possuem um controlo muito preciso, podem interromper o fornecimento quando a bateria se encontra carregada e são usados para carregar baterias com requisitos mais exigentes.



**Figura 57 – Métodos típicos de carga de baterias: a) carga a tensão constante; b) carga combinada [61]**

Um outro método, o *pulse charging*, consiste numa série de impulsos de corrente muito elevados, fornecidos à bateria, até que a tensão atinja um valor definido [148]. Segundo a mesma fonte, a principal vantagem de um carregador de impulsos é a redução significativa de calor na bateria, podendo reduzir significativamente o tempo de carga e as perdas energéticas. Uma outra fonte [149] refere que o método *pulse charging* aplicado em baterias de íões de lítio, para além de diminuir o tempo de carga, resulta numa maior capacidade de descarga e numa vida útil mais longa da bateria.

## **2.8 Segurança de veículos elétricos**

A norma ISO 6469 especifica condições de segurança para veículos elétricos, híbridos e movidos com *Fuel cell*. A primeira parte da norma refere questões de segurança relacionadas com o armazenamento de energia. Aborda questões como a resistência mecânica do isolamento da bateria, a emissão de gases perigosos (tóxicos, incendiários ou explosivos) e a obrigatoriedade de se efetuar um *crash test* para avaliar a proteção contra curto-circuito. Refere ainda uma simbologia de marcação, para veículos elétricos, em relação à classe de tensão dos circuitos. Esta informação é particularmente útil, em caso de acidente, para que as equipas de socorro saibam como atuar.

Na segunda parte da norma, são abordados temas como a segurança no sistema de propulsão, a compatibilidade eletromagnética, sistemas de proteção contra falhas e sistemas de resposta em casos de emergência.

## **2.9 Conclusões do capítulo**

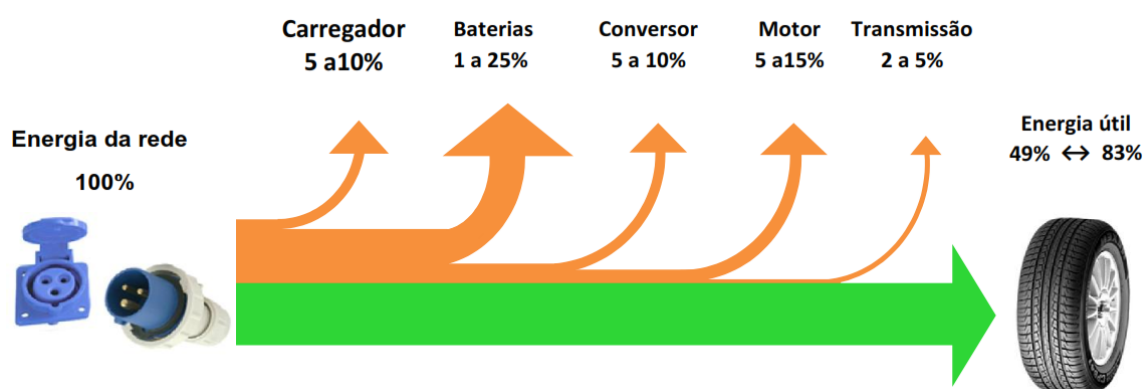
A abordagem realizada ao estado da arte permitiu de um modo geral, constatar que os carros elétricos atuais possuem uma autonomia relativamente reduzida e um custo elevado. No entanto assiste-se a uma grande movimentação dos fabricantes de automóveis (que se nota pelo investimento, investigação e exibição de protótipos) e a grandes debates políticos, ambientais e tecnológicos, o que indica que neste momento pode estar a eclodir uma grande revolução na mobilidade elétrica. Os motores em geral apresentam tecnologias bastante fiáveis e “maduras”, destacando-se o motor de relutância comutada (SRM) que ultimamente tem sido bastante desenvolvido. As baterias de lítio parecem ser as que oferecem uma maior densidade energética, sendo que destas, as mais seguras são as que incorporam fosfato de ferro ( $\text{LiFePO}_4$ ).

### 3 TRABALHO TEÓRICO

Neste capítulo abordam-se as equações que permitem dimensionar a potência do motor e das baterias de um carro elétrico. Explora-se um método de construção do mapa de rendimento do motor, faz-se referência ao rendimento de baterias e faz-se uma estimativa do consumo e da autonomia do Little4.

#### 3.1 Rendimento do carro elétrico

A recolha de valores típicos de rendimento, em várias fontes, para cada um dos órgãos do carro elétrico, permitiu a construção de um diagrama de Sankey, também designado por diagrama de fluxo (Figura 58).



**Figura 58 - Diagrama de Sankey do fluxo de energia**

Através dos dados do diagrama pode calcular-se o rendimento entre a energia da rede e a energia útil, que para o melhor cenário é cerca de 83% e para o pior cenário é cerca de 49%. Da observação do diagrama nota-se também que a bateria e o motor, podem representar a maior perda no fluxo de energia do veículo elétrico. Assim torna-se imperativo uma abordagem mais detalhada a estes dois órgãos.

### 3.1.1 Rendimento do motor

O rendimento de um motor elétrico, que se encontra na chapa de características do motor, vem especificado em relação ao ponto nominal. Aferir o rendimento noutras condições de funcionamento, é algo bastante complexo e exige o conhecimento de parâmetros nem sempre disponíveis e difíceis de medir. Para contornar o problema, aborda-se um método simples que permite estimar o rendimento em qualquer regime (carga e velocidade), que apesar de não ser um método preciso, permite uma aproximação razoável dos resultados para todos os tipos de motores (Larminie *et al.* [23]).

O rendimento de motores elétricos, varia com o tipo de motor, a potência nominal para a qual foi projetado, o binário e a rotação que lhe são aplicados. Algumas tabelas com rendimentos típicos, bem como as normas que regem os motores elétricos, podem ser consultadas em <sup>(3)</sup>.

A definição de rendimento do motor elétrico é o rácio entre a potência mecânica gerada  $P_m$  e a potência eléctrica ou de consumo (potência mecânica somada à potência perdida):

$$\eta = \frac{P_m}{P_m + P_{perd}} \quad (4)$$

Ou seja a potência perdida em (W) é:

$$P_{perd} = P_m \times \left( \frac{1}{\eta} - 1 \right) \quad (5)$$

Segundo Larminie *et al.* [23] existem maioritariamente quatro tipos de perdas no motor elétrico: perdas por efeito de Joule, perdas magnéticas, perdas mecânicas e “outras perdas”. As perdas por efeito de Joule, dependem da resistência à passagem de corrente nos enrolamentos de cobre e nas escovas (caso o motor as possua). Esta energia perdida produz aquecimento em vez de trabalho motor. Este tipo de perda é a mais acentuada em motores de baixa potência.

As correntes parasitas designadas por correntes de Foucault, são responsáveis por perdas magnéticas ou perdas no entreferro. Estas correntes são proporcionais à frequência, que quanto mais

---

<sup>3</sup> [http://www.iea.org/papers/2011/EE\\_for\\_ElectricSystems.pdf](http://www.iea.org/papers/2011/EE_for_ElectricSystems.pdf)

elevada, maior é a taxa de troca de polos magnéticos (histerese), logo maior é a perda, que se manifesta no aquecimento do “ferro”.

As perdas mecânicas devem-se ao atrito dos rolamentos, ao atrito entre o rotor e o ar envolvente e à ventilação (caso esta esteja acoplada ao veio). Dependem essencialmente do tamanho do motor e variam com o cubo da velocidade.

Por último, existem perdas que não variam com a velocidade nem com o binário, são diversas perdas que se sabe que existem, embora a literatura não explique bem a sua proveniência, e são representadas por uma constante chamada de “outras perdas”. Segundo [23] estas perdas poderão ser desprezáveis, em motores de ímanes permanentes e com escovas. Em todos os outros casos podem ter um valor bastante significativo, principalmente em motores de excitação separada.

Inserindo estas perdas na equação (4), fica:

$$\eta = \frac{P_m}{P_m + P_{EJ} + P_{MAG} + P_{MEC} + C} \quad (6)$$

Onde  $P_{EJ}$  representa as perdas por efeito de Joule,  $P_{MAG}$  as perdas no entreferro,  $P_{MEC}$  as perdas mecânicas e  $C$  “outras perdas”.

O mesmo autor estabelece uma relação entre a clássica equação eléctrica de perdas por efeito de Joule e o binário:

$$R \times I^2 \cong k_c \times T^2 \quad (7)$$

Onde  $k_c$  é uma constante. Larminie *et al.* [23] relaciona também todas as perdas da equação (6) com a variação do binário ou da velocidade, tomando assim a seguinte forma:

$$\eta = \frac{T \times \omega}{T \times \omega + k_c \times T^2 + k_i \times \omega + k_w \times \omega^3 + C} \quad (8)$$

Onde:  $T$  é o binário,  $\omega$  é a velocidade angular e  $k_c$ ,  $k_i$ ,  $k_w$ ,  $C$  são coeficientes associados às perdas: por efeito de Joule, no entreferro, mecânicas e “outras perdas”, respectivamente. O coeficiente  $C$  é expresso em Watt.

Deixa-se aqui um alerta, segundo Camargo [18] as perdas eléctricas por efeito de joule em **motores trifásicos** são:

$$P_{EJ} = 3R \times I^2 \quad (9)$$

Então, para manter a equivalência da equação (7), no caso de motores trifásicos, deve multiplicar-se por três o segundo membro da equação:

$$3R \times I^2 \cong 3k_c \times T^2 \quad (10)$$

Estes coeficientes, podem ser colhidos experimentalmente em laboratório (o que é um processo complexo e moroso) ou então podem ser estimados. A norma IEC 60034 refere uma distribuição de perdas para o motor de indução (carcaça 315), que se mostra na segunda coluna da Tabela 7. A alimentação por PWM, não consegue uma onda sinusoidal perfeita, como foi abordado no subcapítulo (2.4.1). Este processo tem perdas acrescidas maioritariamente magnéticas, causadas pelas tensões harmónicas. A mesma norma contempla uma percentagem incremental de perdas para alimentação por PWM. Geralmente os fabricantes usam condensadores nos seus inversores de forma a atenuar este efeito.

Outros autores referem valores para as perdas do motor de indução (para dois e quatro polos) que são um pouco diferentes aos da Tabela 7. A norma IEC 60034-31 também refere um intervalo de valores típicos para motores de indução de 4 polos, no entanto neste trabalho adoptam-se os valores da tabela Tabela 7.

**Tabela 7 – Perdas no motor de indução (carcaça 315) segundo a norma IEC 60034-17**

Alimentação		Sinusoidal (%)	Incremento de perdas com alimentação por PWM (%)
Perdas			
Perdas por efeito de joule	Estator	41	0,5
	Rotor	26	2
Perdas magnéticas (entreferro)		25	12
Perdas mecânicas		6	-
Outras perdas		2	0,5

A folha de dados do motor do Little4 (anexo B) refere um rendimento de 85% para uma potência nominal de 4kW às 3900 rpm (408,4rad/s) e uma alimentação à frequência de 135 Hz (sinal sinusoidal). Dividindo a potência pela velocidade angular, obtêm-se um binário de 9,79Nm.

Com estes dados e através da equação (5) calcula-se a potência perdida:

$$P_{perd} = 4000 \times \left( \frac{1}{0,85} - 1 \right) = 705,9W$$

Esta perda multiplicada pelas percentagens da Tabela 7 e igualando com as parcelas do denominador da equação (8), tendo em atenção que o motor é trifásico (3 vezes as perdas), permite a obtenção do coeficiente  $k_c$ :

$$P_{EJ} = (0,41 + 0,26) \times P_{perd} = 3 \times k_c \times T^2 \leftrightarrow k_c = \frac{0,67 \times 705,9}{3 \times 9,79^2} = 1,645$$

Para o coeficiente  $k_i$ :

$$P_{MAG} = 0,25 \times P_{perdida} = k_i \times \omega \leftrightarrow k_i = \frac{0,25 \times 705,9}{408,4} = 0,432$$

Do mesmo modo, para  $k_w$ :

$$P_{MAG} = 0,06 \times P_{perdida} = k_w \times \omega^3 \leftrightarrow k_w = \frac{0,06 \times 705,9}{408,4^3} = 6,218^{-7}$$

Por último a constante  $C$ :

$$C = 0,02 \times P_{perdida} = 0,02 \times 705,9 = 14,118 \text{ W}$$

Afectando os coeficientes das perdas calculadas acima com as perdas acrescidas por alimentação com sinal PWM, mostrados na Tabela 7, fica-se com os seguintes valores:

$$\begin{aligned}
k_c &: 1,645 \times (1 + 0,025) = 1,686 \\
k_i &: 0,432 \times (1 + 0,12) = 0,484 \\
k_w &: 6,218^{-7} \\
C &: 14,118 \times (1 + 0,005) = 14,189\text{W}
\end{aligned}$$

Assim, se o motor for alimentado por PWM, sofre um acréscimo de cerca de 15% nas suas perdas. Isto é, para um motor que tenha um rendimento de 85%, quando alimentado por PWM, esse rendimento baixa para 82,75%.

### 3.1.1.1 Implementação em MATLAB

Elaborou-se um algoritmo, codificado em MATLAB baseado nesta metodologia (ver anexo C) que importa dados do Excel, binário e rotação, e constrói uma malha, como se explica a seguir:

Coloca-se um vector para o binário:

$$bin = [b_1 \quad b_2 \quad b_3]$$

E outro para a rotação:

$$rot = [r_1 \quad r_2 \quad r_3 \quad r_4 \quad r_5]$$

Repare-se que os vectores *bin* e *rot* podem ter dimensões diferentes.

A seguir, com comando *meshgrid* do MATLAB é criada uma matriz para cada um dos vectores *bin* e *rot*.

$$malha\_bin = \begin{bmatrix} b_1 & b_2 & b_3 \\ b_1 & b_2 & b_3 \\ b_1 & b_2 & b_3 \\ b_1 & b_2 & b_3 \\ b_1 & b_2 & b_3 \end{bmatrix} \quad malha\_rot = \begin{bmatrix} r_1 & r_1 & r_1 \\ r_2 & r_2 & r_2 \\ r_3 & r_3 & r_3 \\ r_4 & r_4 & r_4 \\ r_5 & r_5 & r_5 \end{bmatrix}$$

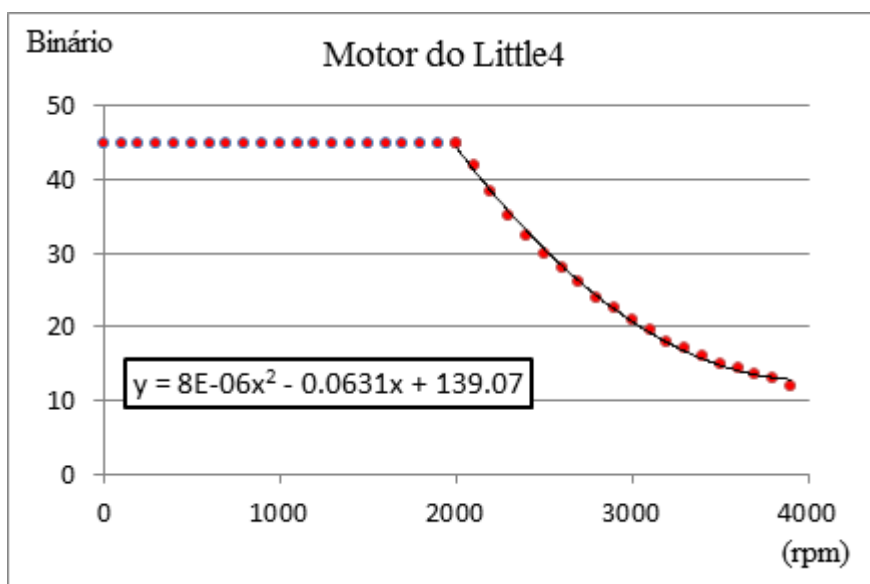
A dimensão de cada vector afecta a dimensão da matriz desta forma: número de linhas da matriz *malha\_bin* provém da dimensão do vector *rot* e o número de colunas provém da dimensão do vector *bin*.



A matriz do rendimento é obtida através da equação (8) e das matrizes da rotação e binário. Vale a pena chamar a atenção para o seguinte facto: as operações têm de ser realizadas com malhas (não são operações algébricas) isto é, a operação é feita apenas entre elementos com a mesma posição matricial  $i,j$  ( $b_{ij}$  com  $r_{ij}$ ) e assim o resultado é uma matriz com a mesma dimensão das anteriores.

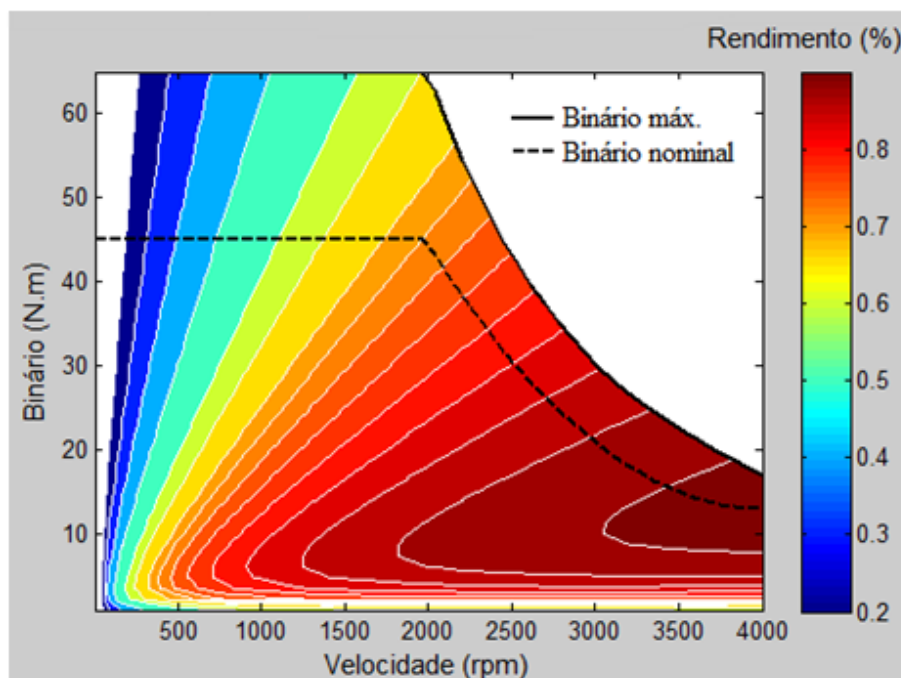
No MATLAB, a diferença entre as operações com matrizes ou com malhas, está em usar um ponto (.) que se coloca nas operações com malhas. Esse ponto deve preceder os operadores de multiplicação, divisão e exponencial.

Para identificar também o binário de funcionamento nominal e máximo, foi elaborada uma tabela em Excel, onde se replicou o gráfico do motor do Little4 (presente no anexo B), colocando alguns pontos e definindo a equação da linha de tendência (Figura 59) Essa linha corresponde à zona de enfraquecimento do regime do motor.



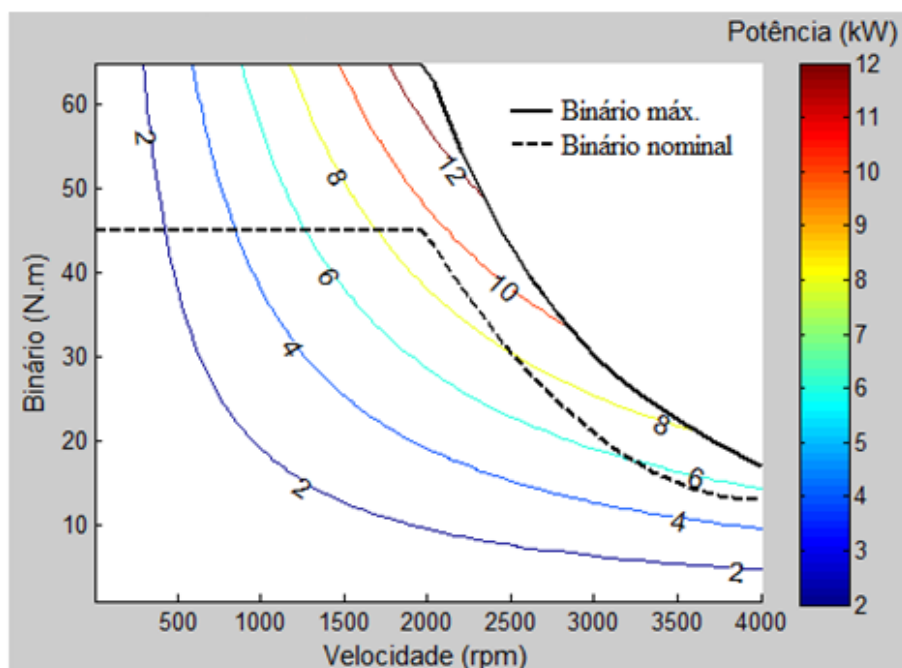
**Figura 59 – Obtenção da equação da curva relativa à zona de enfraquecimento do motor, através de pontos do gráfico presente no *datasheet* do motor do Little4 (anexo B)**

O código escrito em MATLAB tem como *inputs* as constantes apuradas na secção 3.1.1, e contém instruções para importar os valores do Excel (Figura 59). O código usa um comando de interpolação dos valores importados em Excel, de forma a obter a dimensão do vector que possibilite o encaixe na matriz do rendimento. Com essa matriz desenha-se o gráfico que se ilustra a seguir (Figura 60).



**Figura 60 – Curvas de rendimento do motor do Little4, alimentado por PWM**

Como já foi referido, o método usado na obtenção deste gráfico (secção 3.1.1) pode não conferir valores precisos do rendimento, no entanto faz uma boa aproximação. O mesmo programa desenha um outro gráfico que permite relacionar as curvas de potência em relação ao binário e velocidade (Figura 61).



**Figura 61 – Curvas de potência do motor do Little4**

Idealmente um motor elétrico deveria funcionar maioritariamente na zona de maior rendimento. Para tal, o motor e a relação de transmissão devem ser escolhidos em função dos requisitos do carro. O acoplamento de uma caixa de velocidades, projetada para tal, forçaria o motor rodar mais tempo nessa zona, no entanto acarretaria alguma perda de rendimento (nas engrenagens) e acrescentaria custo ao projeto.

### 3.1.2 Rendimento e descarga da bateria

O rendimento de uma bateria é dado pelo rácio entre a energia que ela fornece sobre a energia necessária para a repor nas condições iniciais. Quando se fala em rendimento de uma bateria engloba-se o rendimento da carga e o da descarga.

O tempo de descarga (em horas) de uma bateria, para uma dada temperatura ambiente, pode ser calculado através do modelo proposto por Peukert [23]:

$$t_{desc} = \frac{C_p}{I^n} \quad (11)$$

Onde  $C_p$  e  $n$  são constantes determinadas através de testes de descarga e  $t_{desc}$  é o tempo de descarga em horas. No entanto o modelo de Peukert tem algumas limitações. Broussely *et al.* [66] refere que a equação não tem em conta o efeito da temperatura e apresenta erros significativos para taxas de descarga bastante elevadas ou bastante baixas. Além disso a capacidade da bateria pode variar com a sua idade. Segundo [150] a constante  $n$  pode tomar valores entre 1.2 e 1.6 para as baterias tradicionais, e entre 1.1 e 1.25 para as baterias de gel.

A corrente nominal  $I$  é determinada através de:

$$I = \frac{C_{nom}}{t_{nom}} \quad (12)$$

Onde  $C_{nom}$  é a capacidade nominal (em Ah) para um tempo de descarga nominal  $t_{nom}$ .

Para a bateria do Little4, de chumbo-ácido da marca Haze, o fabricante refere duas capacidades de descarga  $C_{20hr} = 245 Ah$  e  $C_{5hr} = 199 Ah$ , com estes valores pode seguir-se o cálculo proposto por Larminie *et al.* [23], começando pela equação (12):

$$I_1 = \frac{245}{20} = 12,25A$$

$$I_2 = \frac{199}{5} = 39,8A$$

Da equação (11), tem-se:

$$I_1^n \times t_{desc1} = I_2^n \times t_{desc2}$$

Reformulando fica

$$n = \frac{\log(t_{desc2}) - \log(t_{desc1})}{\log(I_1) - \log(I_2)} \quad (13)$$

Substituindo os valores, obtêm-se:

$$n = \frac{\log(5) - \log(20)}{\log(12,25) - \log(39,8)} = 1,1765$$

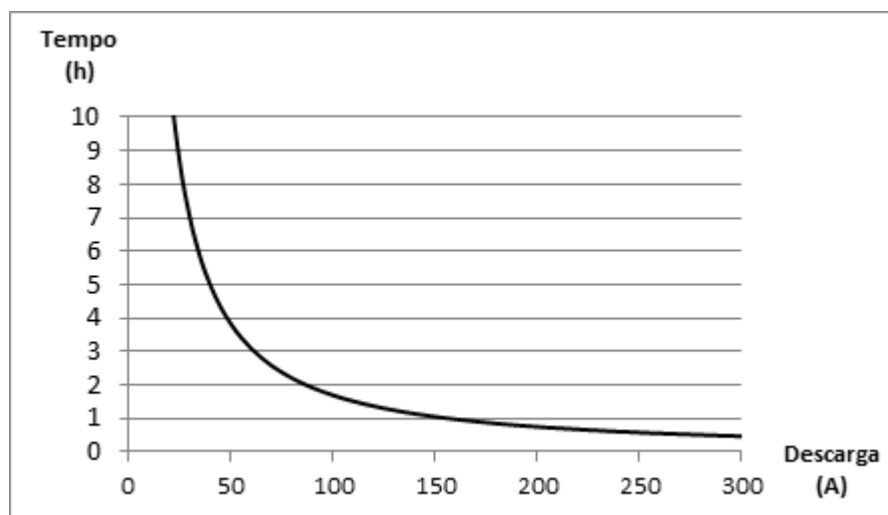
Com estes dados já se pode calcular a constante de Peukert, presente na equação (11):

$$C_p = 39,8^{1,1765} \times 5 = 381,3Ah$$

Assim, para uma dada intensidade de corrente pode ser estimado o tempo de descarga da bateria, por exemplo, para uma descarga a 200A, através da equação (11) fica:

$$t_{desc} = \frac{C_p}{I^n} = \frac{371,3}{200^{1,1765}} = 0,73horas \approx 44 \text{ min}$$

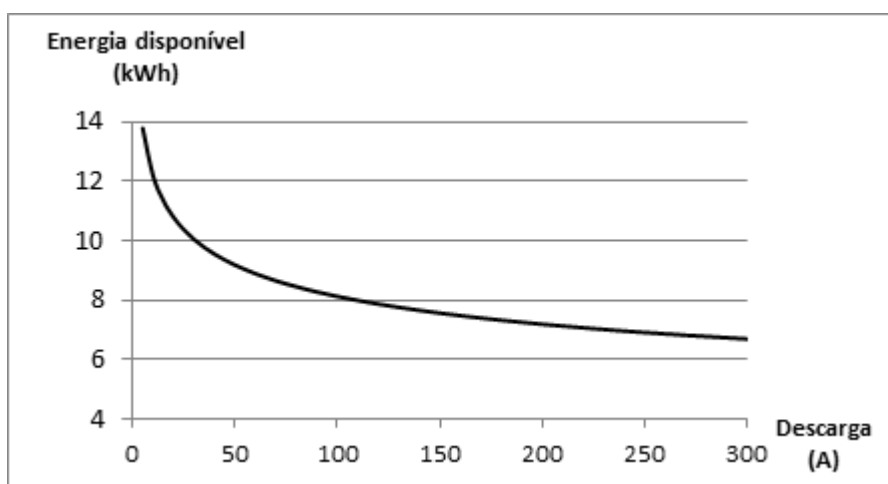
Com esta equação elaborou-se um gráfico em Excel (Figura 63) que corresponde à bateria do Little4.



**Figura 62 – Estimativa de tempo de descarga da bateria em função da corrente solicitada.**

Neste gráfico pode ver-se que quanto mais elevada for a corrente de descarga menor será o tempo até que esta fique descarregada, obedecendo a uma variação não linear.

O Little4 possui 4 baterias de 12V em série, logo o *pack* de baterias tem uma tensão nominal de 48V. Multiplicando esta tensão pela corrente e pelo tempo, é obtida uma estimativa da energia disponível, que as baterias podem fornecer, em função da corrente de descarga (Figura 63).



**Figura 63 – Estimativa da energia disponível no *pack* de baterias em função da corrente solicitada.**

Observa-se no gráfico da Figura 63 que a corrente de descarga afeta a quantidade de energia disponível, assim pode deduzir-se que também afetará o rendimento das baterias. No entanto, como

foi referido no início deste subcapítulo, o rendimento de uma bateria é o rácio entre a energia que ela fornece sobre a energia necessária para a repor nas condições iniciais.

A taxa de carga e descarga da bateria não deverá ultrapassar certos valores, ditados pelos fabricantes, acima dos quais a bateria poderá sofrer danos, agravando a sua performance e reduzindo a sua vida útil.

A capacidade da bateria também é afetada pela temperatura. Broussely *et al.* [66] refere uma equação que contabiliza esse efeito:

$$C_T = C_{30} \times [1 + 0,008 \times (T - 30)] \quad (14)$$

A temperatura  $T$  é expressa em  $^{\circ}\text{C}$ , ou seja: para uma bateria de capacidade de 100 Ah à temperatura de referência de  $30^{\circ}\text{C}$ , se for colocada à temperatura de  $5^{\circ}\text{C}$  ficará com uma capacidade de:

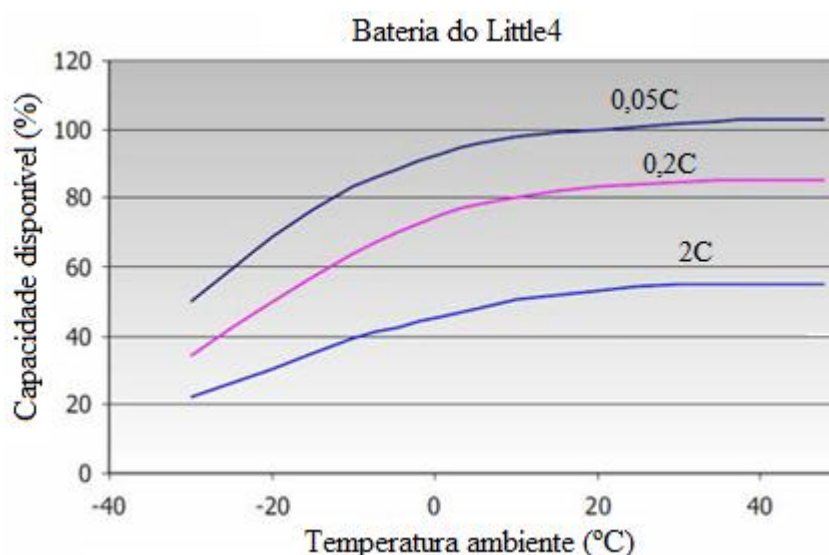
$$C_5 = 100 \times [1 + 0,008 \times (5 - 30)] = 80 \text{ Ah}$$

Uma outra fonte apresenta outra correspondência entre a temperatura e a capacidade da bateria, para taxas de descarga baixas (Tabela 8).

**Tabela 8 – Relação da capacidade com a temperatura, para taxas de descarga C/20 [151]**

Temperatura ( $^{\circ}\text{C}$ )	-40	-30	-20	-10	0	10	20	30	40	50
Capacidade (%)	45	56	67	78	86	94	100	104	108	112

O fabricante das baterias do Little4 (da marca Haze), apresenta um gráfico que mostra a relação entre a capacidade disponível e a temperatura, para três taxas de descarga (Figura 64). Nesse gráfico observa-se que para se obter os 100% da capacidade da bateria (tal como foi visto na Tabela 8) a temperatura deve ser de  $20^{\circ}\text{C}$  e a taxa de descarga deve ser baixa ( $\text{C}/20=0,05\text{C}$ ). Como a capacidade nominal da bateria é de  $\text{C}_{20}=245\text{Ah}$ , então  $0.05\text{C}$  equivale a  $12.25\text{Ah}$ .



**Figura 64 – Capacidade da bateria do Little4 em relação à taxa de descarga e temperatura**

Existem vários modelos para estimar o estado de carga (SoC *State of Charge*) de uma bateria, uns mais complexos do que outros. Contudo um método muito prático consiste na estimativa através da tensão da bateria (em circuito aberto). A Tabela 9 mostra a relação entre o estado de carga e a tensão, para uma bateria de 12V (6 células), bem como a corrente que se recomenda para a sua carga.

**Tabela 9 - Relação entre o estado de carga e a tensão (em circuito aberto) de uma bateria de chumbo-ácido VRLA de gel (a 25 °C) (adaptado de [151])**

SoC bateria (%)	Energia visível ao utilizador (%)	Tensão por célula (V)	Tensão (V) (bat. 12V)	Carga recomendada	
				Tensão (V)	Corrente (A)
100	100	2,12	12,7	12,8 - 13,2	5 A
90	85	2,08	12,5	14,2 - 15,5	5 A
80	75	2,07	12,4		
70	65	2,05	12,3	10,5 - 15	O limite da bateria
60	55	2,03	12,2		
50	45	2,01	12,1		
40	30	1,98	11,95		
30	15	1,96	11,8		
20	0	1,93	11,6		
10		1,89	11,3		
0		1,75	10,5		

O utilizador deverá ver, no indicador do painel de bordo, uma percentagem de energia disponível que corresponda à profundidade de descarga que se pretende. Segundo [150] o estado de carga de

uma bateria de chumbo-ácido não deve ser inferior a 20% à temperatura ambiente, porque isso reduziria o seu tempo de vida útil.

Um outro modelo também muito simples para determinar a percentagem do estado de carga de baterias de chumbo-ácido VRLA, é baseado na medição da tensão em circuito aberto ( $U_{OCV}$ ) e consiste na seguinte equação [150]:

$$SOC = 84 \times U_{OCV} - 984 \quad (15)$$

Com  $U_{OCV}$  delimitado entre  $11.9 \text{ V} < U_{OCV} < 13.0 \text{ V}$ .

A tensão da bateria em carga pode ser calculada através da seguinte equação:

$$U = U_{OCV} - I \times R_C \quad (16)$$

Onde  $I$  é a intensidade de corrente (A) e  $R_C$  é a resistência interna da bateria ( $\Omega$ ), que segundo Larminie *et al.* [23], para baterias de chumbo-ácido, pode ser calculada através da equação:

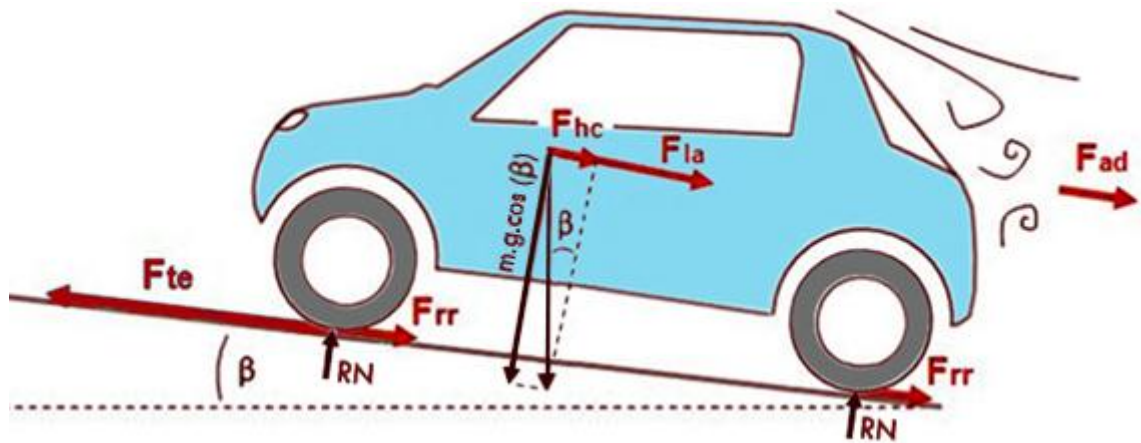
$$R_C = n_{cells} \times \frac{0,022}{C_{10}} \quad (17)$$

Onde consta o número de células de que a bateria é composta ( $n_{cells}$ ) e  $C_{10}$  é a capacidade de descarga para 10 horas (Ah).

### 3.2 Dimensionamento do motor

O motor do veículo deve ter binário suficiente para vencer a resistência ao rolamento, o arrasto aerodinâmico e o declive dos percursos a que o carro se destina. Estas forças podem ser representadas através do esquema da Figura 65, cujas equações se abordam a seguir. Para além disso, o motor deve corresponder às especificações pretendidas pelos potenciais clientes, como a aceleração e velocidade máxima.





**Figura 65 - Esquema das forças que atuam num veículo**

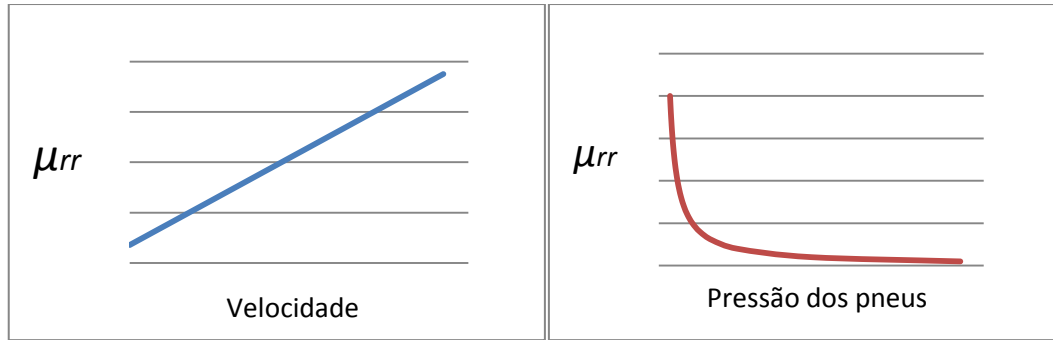
A força causada pela **resistência ao rolamento** está diretamente associada ao peso do carro, ao tipo e pressão dos pneus, ao piso e à temperatura. Esta força aumenta com o pavimento molhado, por causa do escoamento da água. Num plano horizontal, e a baixa velocidade é a principal força que se opõe ao rolamento do carro. A resistência ao rolamento pode ser calculada através da equação:

$$F_{rr} = \mu_{rr} m \times g \times \cos(\beta) \quad (18)$$

A força  $F_{rr}$  é expressa em (N), o coeficiente de atrito de rolamento  $\mu_{rr}$  depende do tipo de pneu, da pressão usada e da rugosidade do pavimento, as restantes variáveis são a massa e a gravidade. O valor de  $\mu_{rr}$  para estrada de asfalto, pode assumir 0.015 para pneus normais e 0,005 para pneus especiais para veículos elétricos. Uma outra equação para o atrito de rolamento, que é referida por Jazar [152], tem em conta a velocidade e a pressão dos pneus:

$$\mu_{rr} = \frac{K}{1000} \left( 5,1 + \frac{5,5 + 9 \times 10^{-4} \times m \times g}{p_p} + \frac{0,011 + 3,88 \times 10^{-7} m \times g}{p_p} \times V_V^2 \right) \quad (19)$$

Para pneus radiais  $K=0,8$ , para não radiais  $K=1$ ;  $m$  é massa do veículo (kg),  $g$  é a aceleração gravítica ( $m/s^2$ ),  $V_V$  é a velocidade (m/s) e  $p_p$  a pressão dos pneus em bar. Na Figura 66 pode ver-se a variação qualitativa do atrito de rolamento em relação à velocidade e à pressão dos pneus.



**Figura 66 - Variação do de atrito de rolamento em relação à velocidade e pressão dos pneus**

Existe uma força adicional  $F_{sx}$  de escorregamento longitudinal, quando o carro acelera ou trava.

Segundo Brito [153] é dada pela equação:

$$F_{sx} = k_x \times \frac{F_{rr}^2}{m \times g} \quad (20)$$

A constante  $k_x$  pode, segundo o mesmo autor, tomar um valor limite de 0,15 (corresponde à máxima aceleração e travagem de 1 G). Esta força é diminuta e pode ser desprezada.

A **força de arrasto** deve-se à aerodinâmica, tem a ver com a resistência ao deslocamento do carro através do ar. Para baixas velocidades esta força não é significativa, mas conforme se aumenta a velocidade a força de arrasto aumenta quadraticamente.

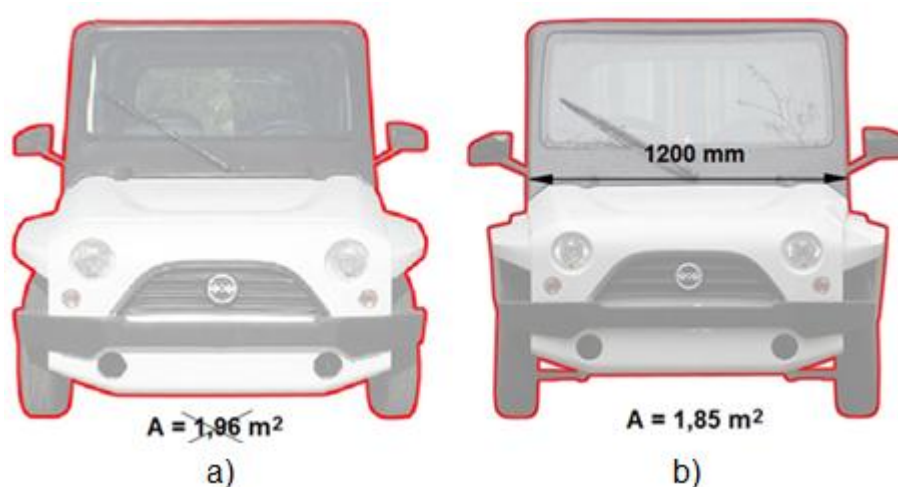
$$F_{ad} = \frac{1}{2} \rho \times A \times C_d \times (V - V_w)^2 \quad (21)$$

Onde  $\rho$  é a densidade do ar ( $\approx 1.2 \text{ kg/m}^3$ ),  $A$  é a área frontal do veículo ( $\text{m}^2$ ),  $C_d$  é o coeficiente de arrasto,  $V$  é a velocidade do carro ( $\text{m/s}$ ) e  $V_w$  é a velocidade do vento (aditiva se estiver no sentido oposto ao veículo e subtrativa se estiver a favor). Convém lembrar que a densidade do ar varia com a temperatura e a altitude.

A área frontal do veículo é a que expõe o veículo visto de frente, como se mostra através do limite das imagens (a vermelho na Figura 67). A área frontal pode ser estimada através de uma fotografia do carro. Importa-se a fotografia para um programa de CAD, coloca-se uma linha de contorno à volta da

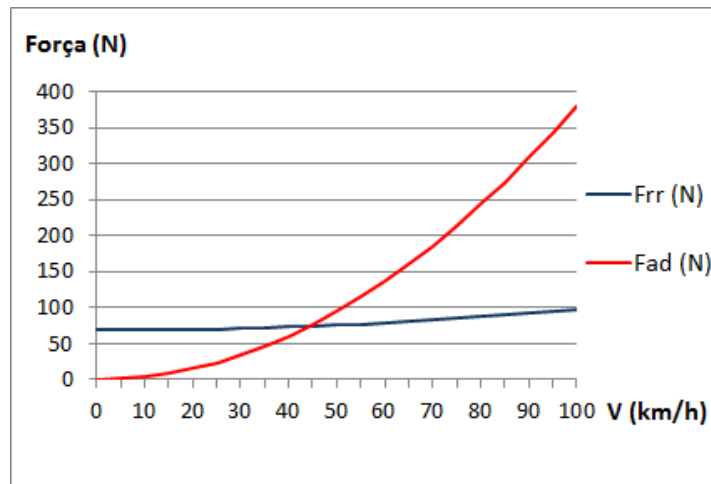
imagem e ajusta-se a escala do desenho para a escala real do veículo (através de uma distância conhecida do veículo).

Este método é fiável para superfícies contidas no mesmo campo de profundidade (distância entre a máquina fotográfica e o objecto). Como a zona frontal apresenta superfícies com várias profundidades (a zona do para-brisas está mais longe da objectiva do que a zona dos faróis), então existe sempre alguma margem de erro associado a este método. A solução para minimizar esse erro, passa por recuar bastante a máquina fotográfica e fazer *zoom*, como se mostra na imagem da direita da Figura 67. Assim as diferenças de profundidade relativas são bastante menores.



**Figura 67 - Área frontal do Little4, à esquerda foto tirada a uma distância de cerca de 8 m, à direita foto tirada a cerca de 50m (com zoom).**

Em carros modernos o coeficiente  $C_d$  situa-se na ordem de 0,3. Para carros elétricos com aerodinâmica mais cuidada, pode situar-se entre 0,15 e 0,25. Para veículos todo o terreno 0,45 é um valor razoável. A força de arrasto  $F_{ad}$  aumenta quadraticamente com a velocidade e pode superar a força de rolamento  $F_{rr}$  a partir de velocidades relativamente baixas, como é o caso do Little4 simulado na Figura 68, tendo como características uma massa de 680 kg,  $C_d=0.45$ , área frontal de  $1.85\text{m}^2$  e pressão dos pneus de 1.5 bar (pressão recomendada pelo fabricante).



**Figura 68 - Comparação entre força de rolamento (Frr) e força de arrasto (Fad) em relação à velocidade.**

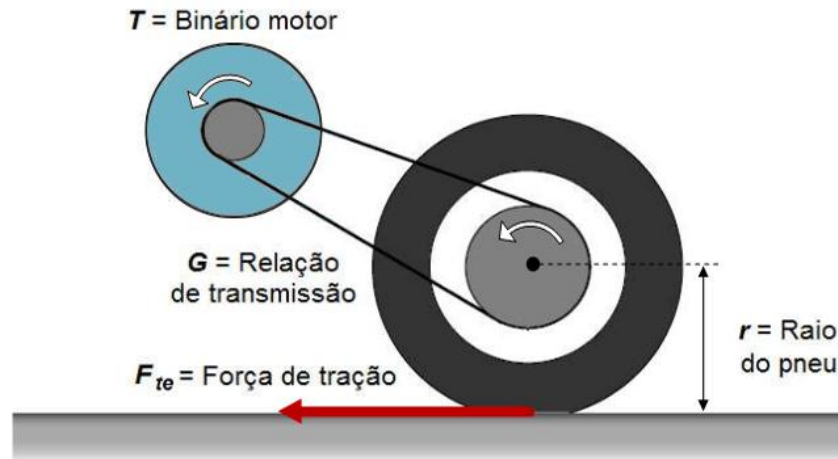
A força necessária para **vencer um declive** ou transpor um buraco (a partir do repouso) não é mais do que a força exercida pelo peso do carro, afectada pelo ângulo da inclinação do pavimento com o plano horizontal adjacente:

$$F_{hc} = m \times g \times \sin(\beta) \quad (22)$$

**Na aceleração**, atendendo à segunda lei de Newton, a força necessária para uma aceleração constante num veículo, de uma forma simplista é:

$$F_{la} = m \times a \quad (23)$$

Mas para de além de acelerar a massa do carro ao longo de uma estrada, é necessário também acelerar angularmente a massa do motor, os elementos de transmissão e rodas do veículo. Todos estes componentes ao rodarem em torno de um eixo possuem um momento de inércia. No entanto, os autores consultados não contabilizam a inércia das engrenagens e as rodas nos seus cálculos. A Figura 69 mostra o esquema generalizado de uma tração automóvel.



**Figura 69 - Esquema de tração de um veículo (adaptado de [23])**

Começando pelo diâmetro do pneu, uma vez que vai ser necessário para os cálculos mais abaixo, através da marca de identificação que se encontra no flanco do pneu, relativa às suas dimensões, **xxx/yy Rtt**, pode ser calculado o seu raio. Segundo o fabricante de pneus Dunlop [154] sabe-se que **xxx** representa a largura do pneu em milímetros, **yy** representa a relação entre a largura e altura (em %), o que significa que a altura do pneu (a diferença entre o seu raio interior e exterior) é **yy (%)** da sua largura. A letra R significa que o pneu é radial (as lonas de tela que o pneu possui estão dispostas radialmente de flanco a flanco) e **tt** é o diâmetro da jante em polegadas. Assim pode facilmente deduzir-se a seguinte equação:

$$r = \frac{xx}{1000} \times \frac{yy}{100} + tt \times \frac{0,0254}{2} \quad (24)$$

No caso do Little4 o pneu 135/80 R13, tem-se um raio de:

$$r = \frac{135}{1000} \times \frac{80}{100} + 13 \times \frac{0,0254}{2} = 0,273m$$

O binário do motor  $T$  (Nm) é dado pela relação:

$$T = \frac{F_{te} \times r}{G} \quad (25)$$

Rearranjando, fica:

$$F_{te} = \frac{G}{r} \times T \quad (26)$$

A velocidade angular do motor ( $\text{rad} \times \text{s}^{-1}$ ) é:

$$\omega = G \frac{v}{r} \quad (27)$$

E a aceleração angular do motor (em  $\text{rad} \times \text{s}^{-2}$ ), vem:

$$\dot{\omega} = G \frac{a}{r} \quad (28)$$

O binário imposto por esta aceleração angular é:

$$T = I_R \times G \frac{a}{r} \quad (29)$$

Aqui o  $I$  é o momento de inércia do rotor do motor (em  $\text{kg/m}^2$ ) é dado pela equação:

$$I_R = \frac{1}{2} m \times r^2 \quad (30)$$

Onde  $m$  é a massa e  $r$  é o raio do rotor. Para o motor de indução de 4kW do Little4 o momento de inércia é de cerca de 0,015  $\text{kg/m}^2$ .

Segundo Larminie *et al.* [23], a aceleração angular do motor exerce nas rodas uma força  $F_{\alpha a}$  que é encontrada através da combinação das equações (29) e (26):

$$F_{\alpha a} = \frac{G}{r} I_R G \frac{a}{r} \quad (31)$$

Rearranjando a equação e introduzindo o rendimento da transmissão, fica:

$$F_{\omega\alpha} = \frac{I_R \times G^2}{\eta_{tr} \times r^2} a \quad (32)$$

Quando o carro **descreve uma curva** existe outra força  $F_{st}$ , associada ao ângulo  $\alpha$  de escorregamento lateral do pneu. A equação geral desta força é:

$$F_{sy} = F_y \times \sin \alpha \quad (33)$$

$F_y$  é a força centrífuga:

$$F_y = \frac{m \times V^2}{r_C} \quad (34)$$

Onde  $V$  é a velocidade (m/s) e  $r_C$  é o raio da curva que o carro percorre (m). Ou então, segundo Brito [153] pode tomar uma outra forma:

$$F_y = C_\alpha \times \alpha \times m \times g \quad (35)$$

A equação é válida para ângulos  $\alpha > 5^\circ$ , onde a constante de rigidez em curva  $C_\alpha$  pode assumir o valor de 0,2 por grau.

Igualando as equações (34) e (35) e resolvendo em ordem a  $\alpha$ , fica:

$$\alpha = \frac{V^2}{C_\alpha \times g \times r_C} \quad (36)$$

Substituindo a equação (34) e (36) na (33) fica:

$$F_{sy} = \frac{m \times V^2}{r_C} \times \sin \left( \frac{V^2}{C_\alpha \times g \times r_C} \right) \quad (37)$$

Assim, a **força total** de tração  $F_{te}$  é dada pela soma das equações já apresentadas:

$$F_{te} = F_{rr} + F_{sx} + F_{ad} + F_{hc} + F_{la} + F_{\omega\alpha} + F_{sy} \quad (38)$$

Para obter a potência mecânica multiplica-se a força total pela velocidade (m/s):

$$P_{mec} = F_{te} \times V \quad (39)$$

Uma outra forma, mais simples mas muito aproximada da potência requerida para o motor é referida por Duke *et al.* [155] que apresenta a seguinte equação:

$$P_{mec} = \frac{C_d \times A \times \rho \times V^3}{2} + m \times g \times \mu_{rr} \times V \quad (40)$$

Onde as unidades são as mesmas assumidas nas equações anteriores.

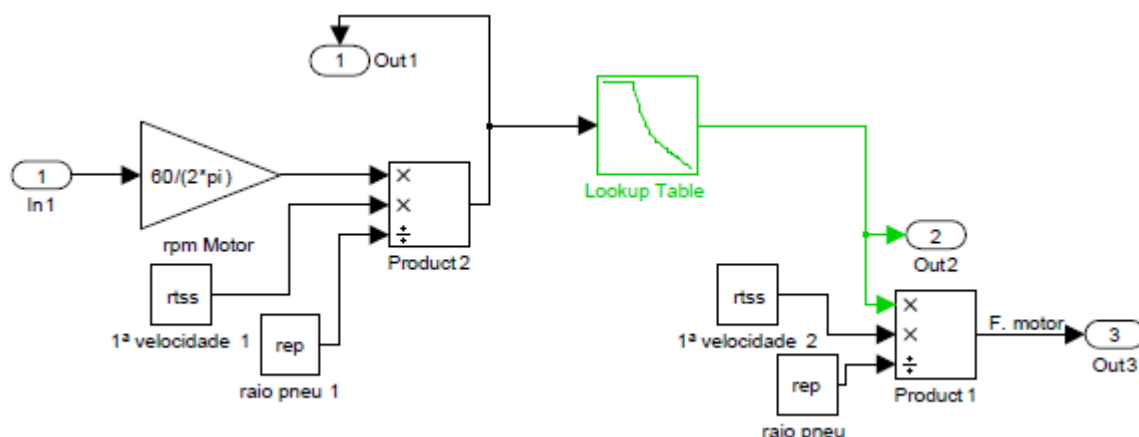
A potência mecânica (W) permite selecionar o motor, ou seja é a que vem na chapa de características do motor. Deve ser verificado se o binário do motor selecionado é suficiente a baixa rotação para terrenos inclinados, de forma a ponderar a existência de uma caixa redutora bem como a sua relação de transmissão.

### **3.2.1.1 Estimativa da velocidade máxima e aceleração**

Tendo como ponto de partida a tabela Excel dos pontos de binário e rotação da curva do motor do Little4, construídos através da linha de tendência já mostrada (Figura 59), juntamente com as equações usadas no cálculo da força de tração (subcapítulo 3.2), elaborou-se uma programa em MATLAB Simulink para estimar a velocidade máxima e a aceleração do carro.

No diagrama em Simulink (anexo D) dentro da caixa com o título “Força fornecida pelo motor”, o subsistema (que se mostra na Figura 70) possui um bloco *Lookup Table* onde está inserida a referida tabela (construída em Excel) através de variáveis “dados\_bin” e “dados\_rpm”. O bloco fica com a aparência gráfica que se pode ver na Figura 70.

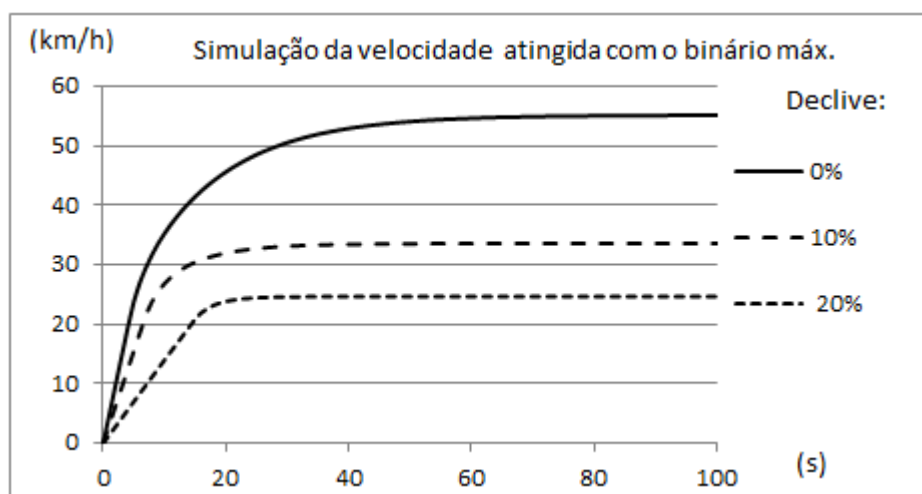




**Figura 70 – Pormenor do diagrama de blocos em MATLAB Simulink**

Um outro aspecto a ter em conta é que quando a potência é tal, que haja escorregamento nas rodas motrizes (derrapar), a partir daí a força de tração exercida no veículo não aumenta, apesar da aceleração das rodas aumentar. Assim a aceleração tem um tecto máximo de aproximadamente 1g. A implementação em MATLAB Simulink deste tecto para a aceleração conta com o bloco *Saturation* que limita a aceleração.

O programa apresenta resultados em forma de gráficos onde pode constar: velocidade, aceleração, deslocamento e todas as forças envolvidas (uma a uma) em relação ao tempo. Nesse programa foram inseridos os dados do Little4 (anexo (E)) e foram simuladas várias situações, uma delas consistiu em alterar o declive do terreno e foi realizada com os dados correspondentes ao binário máximo (de pico) do motor. Com os resultados obtidos foi elaborado o gráfico da Figura 71.



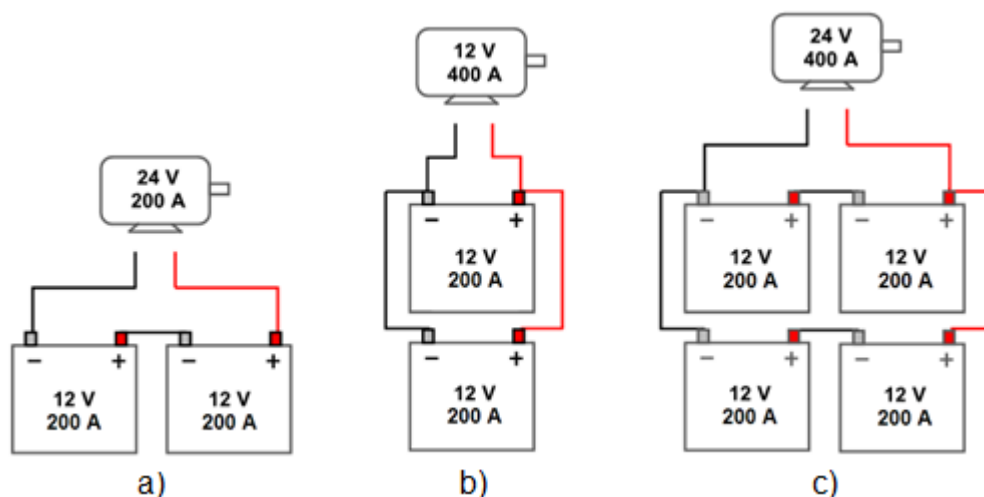
**Figura 71 – Gráfico do perfil de velocidade do Little4 (motor de 4kW) para o binário máximo**

As curvas tendem assintoticamente para uma certa velocidade, que é quando a força motora é anulada pelo conjunto de forças que atuam em sentido contrário (força de arrasto, atrito de rolamento, etc.) Assim, a velocidade máxima que o carro pode atingir (em terreno sem inclinação) ronda os 55 km/h (em binário de pico), pode ver-se também que a aceleração de 0 aos 50km/h demora cerca de 28 segundos. Observa-se ainda que em terrenos com um declive de 10% (muito frequentes no norte de Portugal) a velocidade máxima não ultrapassa os cerca de 34km/h.

### 3.3 Dimensionamento da bateria

Na ligação de baterias, os conjuntos de unidades em série, por convenção representam-se com  $nS$ , e conjuntos de unidades em paralelo por  $nP$ , sendo  $n$  o número de unidades. Por exemplo:  $4S$  significa quatro unidades em série, cuja tensão é igual a quatro vezes a tensão nominal de uma unidade;  $3P$  são três unidades em paralelo com capacidade igual a três vezes a capacidade nominal  $C$  de uma unidade.

Com o auxílio da Figura 72, relembra-se como se procede à ligação em série e em paralelo e como isso afecta a tensão e a corrente.



**Figura 72 - Esquema de ligação de baterias: a) 2S, b) 2P, c) 2S2P.**

Para estimar a capacidade e o número de baterias necessárias, bem como a forma de serem ligadas, começa-se por calcular a energia  $E_{necess}$  (em Wh) que o carro necessita para percorrer o número de quilómetros  $N_{km}$  que se pretende para a autonomia do carro:

$$E_{necess} = 10 \times Cons_{méd} \times N_{km} \quad (41)$$

Onde  $Cons_{méd}$  é uma média do consumo para o tipo de viagens a que o carro se destina. Como o consumo vem em kWh/100km = 1000Wh/100km = 10Wh/km), daí o fator 10 presente na equação.

A capacidade necessária  $C_{necess}$  (em Ah) é afectada pela profundidade de descarga máxima e a percentagem de autodescarga da bateria, podendo a equação tomar a seguinte forma [156]:

$$C_{necess} = \frac{E_{necess}}{V_{bat} \times \frac{DoD_{máx}}{100} \times \left( \frac{100 - AD_{sem}}{100} \right)} \quad (42)$$

Onde  $V_{bat}$  é a tensão nominal do *pack* de baterias (V),  $DoD_{máx}$  é a profundidade máxima de descarga e  $AD_{sem}$  é a percentagem de autodescarga semanal (para baterias de chumbo-ácido  $DoD = 80\%$  e  $AD_{sem} = 1\%$ , são valores aceitáveis). Deve verificar-se que a  $C_{necess}$  seja maior que a corrente que o motor necessita durante uma hora, caso contrário deve ser tomado esse valor para a  $C_{necess}$ .

O número de baterias em série  $nS$  é obtido dividindo a tensão do *pack* de baterias pela tensão de uma bateria unitária.

$$nS = \frac{V_{bat}}{V_{unid}} \quad (43)$$

O número de grupos de baterias em paralelo é calculado dividindo a capacidade necessária pela capacidade nominal de uma bateria:

$$nP = \frac{C_{necess}}{C_{nom}} \quad (44)$$

Este número tem de ser arredondado para o número inteiro mais próximo. Se for arredondado para superior, então a autonomia será maior e o rendimento da descarga da bateria será melhor, mas aumentará custo e o peso do carro, por outro lado, se for arredondado para um número inferior o efeito será o contrário.

Para calcular a autonomia é necessário saber a quantidade de energia armazenada no *pack* de baterias, que pode ser calculada através da equação:

$$E_{bat} = V_{bat} \times C_{bat} \times \frac{DoD_{m\acute{a}x}}{100} \quad (45)$$

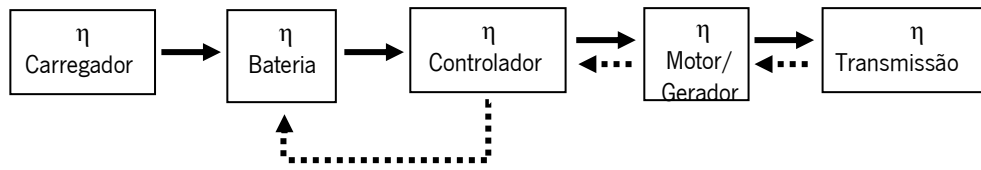
Nesta equação a energia  $E_{bat}$  (Wh), a tensão  $V_{bat}$  (V) e a capacidade  $C_{bat}$  (Ah), são referentes ao *pack* de baterias. O fator  $DoD_{m\acute{a}x}$  é expresso em percentagem. Quanto maior for a percentagem de descarga  $DoD$ , menor será o tempo de vida das baterias (principalmente em baterias de chumbo-ácido), pelo que deve existir um compromisso entre o armazenamento de energia e o custo da substituição das baterias.

### 3.4 Estimativa do consumo e autonomia

O cálculo do consumo é adquirido através da energia necessária ao deslocamento do carro subtraindo a energia da regeneração. A energia (em Wh) pode ser obtida integrando a potência (em W) em ordem ao tempo (em s) como mostra a equação (46). A potência motora e a travagem regenerativa são afectadas pelos respectivos rendimentos.

$$E = \frac{1}{3600} \int \left( \frac{P_{motriz}}{\eta_{motriz}} - P_{regen} \times \eta_{regen} \right) dt \quad (46)$$

No rendimento motor constam os rendimentos de cada um dos órgãos, desde a bateria até à roda do carro. Na travagem regenerativa, o fluxo de energia é o mostrado no esquema da Figura 73, a traço interrompido.



**Figura 73 – Rendimentos no fluxo de energia (regeneração a traço interrompido)**

E o consumo, em kWh/100km, pode ser estimado através da equação:

$$Cons = \frac{(E + Cons_{access}) \times 100}{1000 \times S} \quad (47)$$

Onde  $E$  é a energia (Wh) despendida para realizar o percurso  $S$  (km) e o  $Cons_{access}$  representa uma estimativa da média do consumo (em Wh) dos acessórios, como o autorrádio, a climatização, a iluminação, entre outros.

Na realidade, a estimativa do consumo é mais complexa do que poderia parecer. A capacidade da bateria está diretamente ligada ao rendimento desta, e depende do tipo de bateria, da temperatura e da rapidez (taxa) de carga ou descarga bem como envelhecimento da bateria. Até o facto de se tratar de uma descarga contínua ou intermitente influencia o rendimento da bateria. Pequenas interrupções na descarga favorecem o rendimento desta. Assim, embora as fórmulas apresentadas sejam válidas os vários rendimentos em jogo podem variar e alterar o consumo.

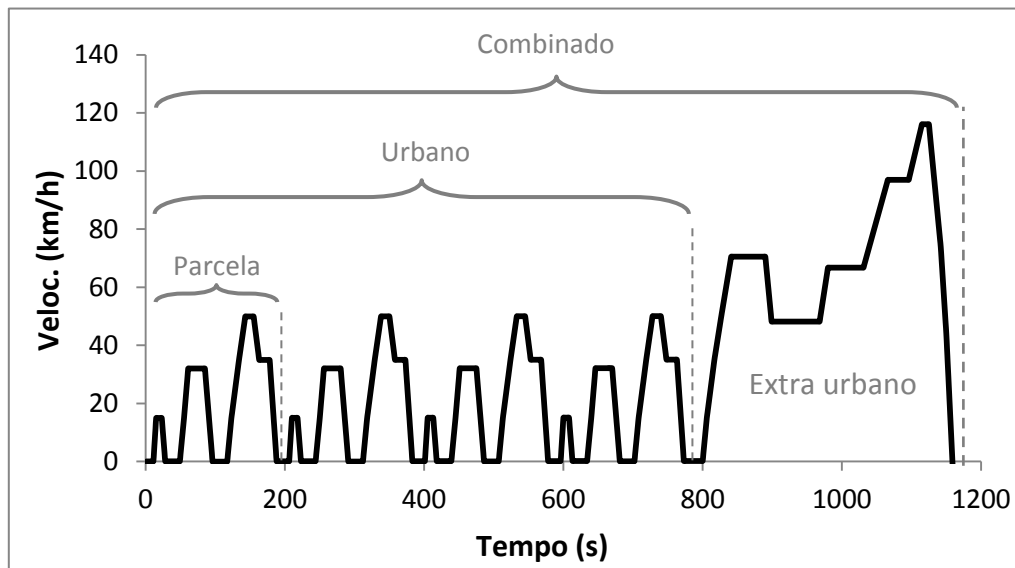
A autonomia é então calculada através da energia do *pack* de baterias  $E_{bat}$  (ver secção anterior) a dividir pelo consumo. Como o consumo vem em kWh/100km e a energia da bateria foi calculada em Wh então é feita a correção de unidades multiplicando por 0.1, desta forma:

$$Auton = \frac{0,1 \times E_{bat}}{Cons} \quad (48)$$

O fator 0,1 presente no numerador, vem da conversão do consumo, através da igualdade  $1/(\text{kWh}/100\text{km}) = 1/(1000\text{Wh}/100\text{km}) = 0,1(\text{km}/\text{Wh})$ . Os rendimentos da bateria, controlador, motor e transmissão já foram contabilizados na equação (46).

Com base nos pressupostos referidos acima, foi elaborado um algoritmo codificado em MATLAB (anexo F) que permite obter uma estimativa do consumo de um veículo elétrico.

Através de dados conhecidos [157], foi elaborado um gráfico em Excel que representa o novo ciclo de condução europeu (urbano, extraurbano e combinado) que se mostra na Figura 74.

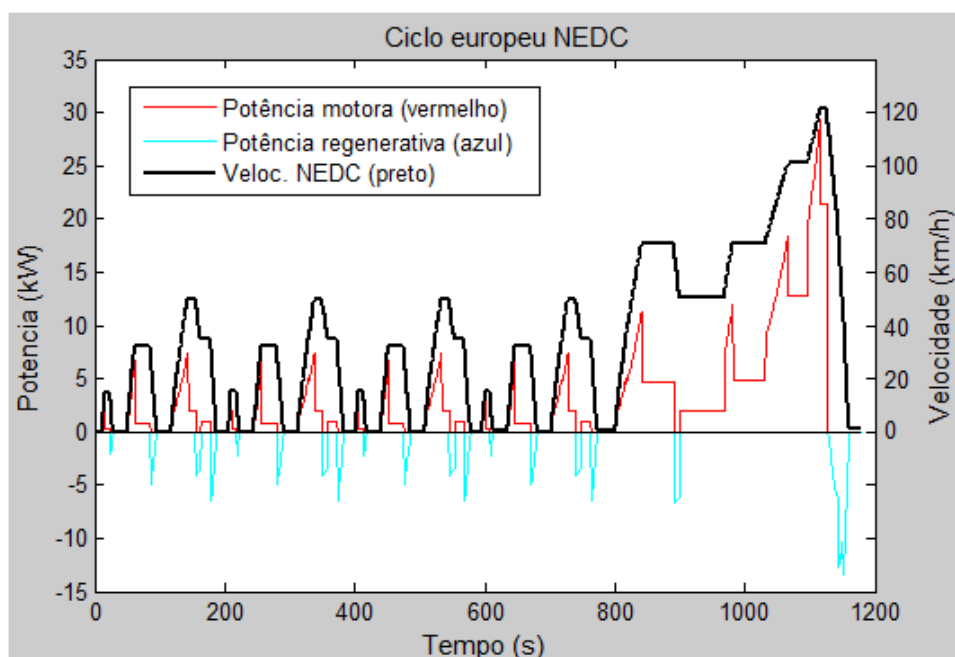


**Figura 74 - Gráfico do NEDC (*New European Driving Cycle*) em Excel**

O MATLAB importa estes dados do Excel e com as equações já descritas (subcapítulo 3.2) permite obter em cada instante: a potência fornecida pelo motor, a potência devido às forças de arrasto, inércias (do carro e da rotação do motor) e a potência máxima que é possível regenerar. No algoritmo pode estabelecer-se um limite de regeneração em função da capacidade máxima de corrente do motor, embora esse limite também dependa da capacidade máxima da bateria, dos cabos de ligação e da existência de condensadores. Caso esse tecto máximo não existisse correr-se-ia o risco de danificar os órgãos elétricos.

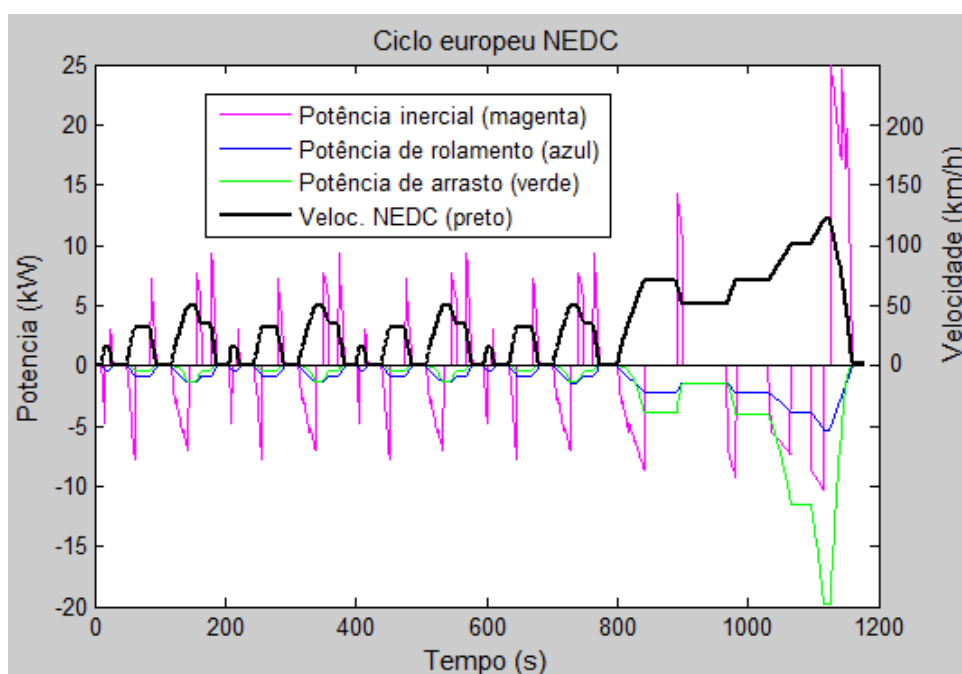
O programa MATLAB permite também incluir fatores como o declive e a existência de curvas, no entanto, o ciclo NEDC (*New European Driving Cycle*) não as contempla.

Ao inserir no programa os dados de entrada do Little4 (anexo E), obtêm-se dois gráficos: o primeiro contempla as potências motoras envolvidas no decorrer do ciclo de condução e o segundo as potências resistentes, inercial, de atrito de rolamento e de arrasto, como se mostra nos gráficos seguintes ( Figura 75 e Figura 76).



**Figura 75 - Gráfico da potência motora e regenerativa para o ciclo combinado (em MATLAB)**

Como o Little4 só pode atingir os 45km/h, só contarão os dados relativos à parte do circuito urbano. No circuito urbano a potência máxima requerida são cerca de 8kW que é superada pela potência máxima do motor do Little4 (9 kW durante 5 minutos).



**Figura 76 - Gráfico da potência inercial, de rolamento e de arrasto, para o ciclo combinado (em MATLAB)**

A travagem regenerativa não recupera toda a potência inercial, alguma é consumida através das potências de rolamento e arrasto. É notória a influência da potência de arrasto a velocidades elevadas.

Através do ciclo de condução, o programa pode estimar o consumo para circuito urbano, extraurbano e combinado. O consumo em circuito extraurbano e combinado não se aplicam ao Little4 quer por imperativos legais (está homologado para um limite de velocidade de 45km/h) quer por este não possuir potência motora suficiente para alcançar tais velocidades. A Tabela 10 mostra uma estimativa de alguns dados que se obtêm com o referido programa. Não foi considerado o consumo de acessórios.

**Tabela 10 – Simulação do consumo e percentagem máxima de regeneração para o ciclo NEDC**

Ciclo de condução NEDC	Consumo (kWh/100km)	Possibilidade de regeneração de energia (%)	Autonomia (km)
Urbano	11,2	34,2	79
Combinado	17,3	14,2	51
Extraurbano	20,8	7,5	43

O menor consumo verifica-se em circuito urbano (11,2kWh/100km), onde a velocidade é baixa conferindo potências de rolamento e de arrasto pouco significativas (como foi mostrado na Figura 76). Essas potências resistentes consomem parte da potência enercial do veículo, o que faz com que a recuperação inercial (através da regeneração) tenha um valor máximo teórico de cerca de 34% da energia total que o veículo necessita. Este valor não contabiliza os rendimentos dos dispositivos de conversão de energia, nem o limite máximo de potência que estes podem absorver.

Para comparar os valores teóricos com os valores experimentais, foram percorridos com o Little4 cerca de 352km (na cidade de Guimarães e proximidades) e verificou-se um consumo médio de 10,7kWh/100km e uma autonomia média de 70,4km (Anexo H). A diferença entre o consumo teórico e experimental pode dever-se ao facto de não se ter obedecido ao ciclo NEDC (é quase impossível em ambiente real urbano), fazendo-se apenas uma condução citadina normal. Um outro aspeto que poderá ter contribuído para a diferença de consumos, foi o facto de na maior parte dos percursos apenas viajar um passageiro (o condutor). A autonomia média verificada é menor que a teórica, isto pode estar relacionado com o facto de não se ter descarregado totalmente a bateria, com o receio de ficar imobilizado na estrada, por falta de energia.



Simulou-se ainda, no programa em MATLAB e para o ciclo de condução urbano NEDC, uma diminuição da massa do carro, um aumento da pressão dos pneus, um menor coeficiente de arrasto e uma diminuição da área frontal. Cada fator foi alterado de forma isolada, mantendo os restantes valores. Esta simulação pretendia analisar quais os fatores mais influentes no consumo do Little4, para que se pudesse sugerir melhorias no carro. Os valores de cada fator alterado e os respectivos resultados mostram-se na Tabela 11.

**Tabela 11 – Simulação do consumo, com alteração isolada de dados inerentes ao Little4, para o ciclo de condução urbano NEDC**

	Fatores		Consumo (kWh/100km)	Autonomia (km)	Melhoria após alterações
Fatores de origem do Little4	Massa do carro + ocup.	830 kg	11,2	78	
	Pressão dos pneus	1,5 bar			
	Coef. arrasto	0,45			
	Área frontal	1,85 m <sup>2</sup>			
Fatores alterados, isoladamente, mantendo os restantes de origem	Massa do carro + ocup.	730 kg	10,0	88	10.7 %
	Pressão dos pneus	2,5 bar	10,2	87	9,8 %
	Coef. arrasto	0,35	10,7	83	4,5 %
	Área frontal	1,75 m <sup>2</sup>	11,1	79	1,1 %
Alteração conjunta de todos os fatores			8,5	103	24 %

Constata-se que a massa do veículo e a pressão dos pneus são fatores importantes no consumo. O coeficiente de arrasto e a área frontal tem um menor impacto no consumo em ciclo urbano, por este estipular velocidades relativamente baixas. Com a alteração de todos os fatores em conjunto, a simulação apresenta uma redução no consumo de cerca de 24%. O aumento da autonomia é afectado no mesmo valor, por esta estar diretamente relacionada com o consumo.

### **3.5 Conclusões do capítulo**

Constatou-se ser possível prever um mapa de rendimento de um motor elétrico, de forma simplificada e com recurso a poucos dados. Conclui-se que esse mapa de rendimento é uma ferramenta fundamental na programação de um veículo elétrico, e que a sua exatidão é suficientemente robusta para o efeito pretendido.

Constatou-se que no modelo de condução urbano (NEDC), a simulação estima um consumo para o Little4 de 11,2 kWh/100km. Verificou-se que uma diminuição da massa do carro, um aumento da pressão dos pneus, um menor coeficiente de arrasto ou uma diminuição da área frontal, alteram o consumo do carro. Concluindo-se que para o modelo de condução urbana, a massa do veículo e a pressão dos pneus são os fatores mais importantes na redução de consumo. O coeficiente de arrasto e a área frontal tem um impacto menor no consumo, em ciclo urbano, por este estipular velocidades relativamente baixas.

## 4 TRABALHO PRÁTICO (EMPRESA SMS)

O trabalho prático, proposto pela empresa SMS, consistia em duas partes, a primeira seria a transformação de um *Buggy* (fabricado pela Buyang group co ltd, como se mostra na Figura 77a em veículo elétrico. Para tal, só interessava do modelo original, o chassis, suspensões e rodas. A parte da modelação da carcaça ficou ao cuidado de uma equipa do Instituto Politécnico do Cavado e do Ave (IPCA) chefiada pelo Professor Paulo Simões.



**Figura 77 – a) *Buggy* fabricado pela empresa Buyang group co ltd, b) Little4 e é fabricado na empresa SMS**

E a segunda parte do trabalho prático, seria a otimização dos parâmetros do controlador do Little4, que é um modelo já comercializado pela empresa acerca de dois anos (Figura 77b).

### 4.1 Conversão do Buggy para elétrico

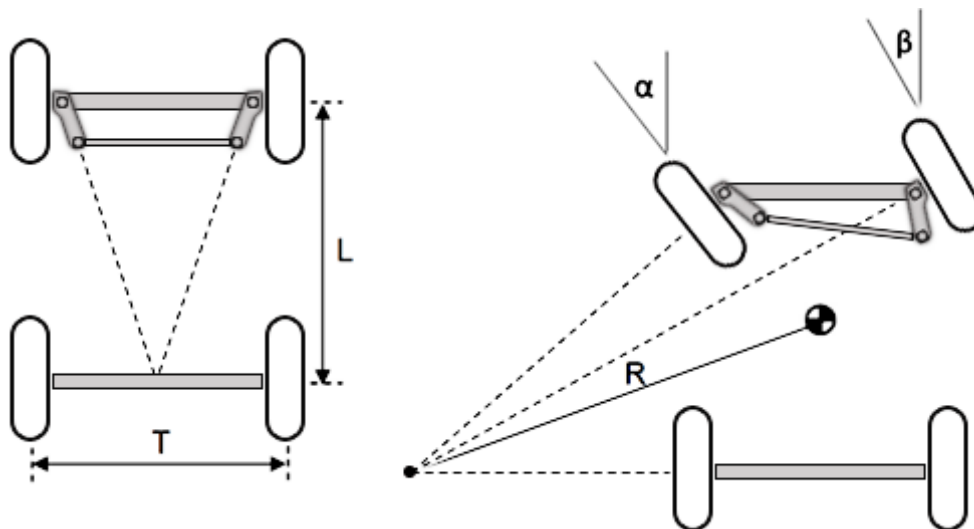
Começou-se pela desmontagem do carro (imagens da Figura 78) para se ter acesso e conhecimento da parte estrutural do modelo e assim projetar a transformação para motorização eléctrica.



**Figura 78 – Desmontagem do Buggy, realizada pelo autor deste trabalho, na empresa SMS**

#### 4.1.1 Correção da direção

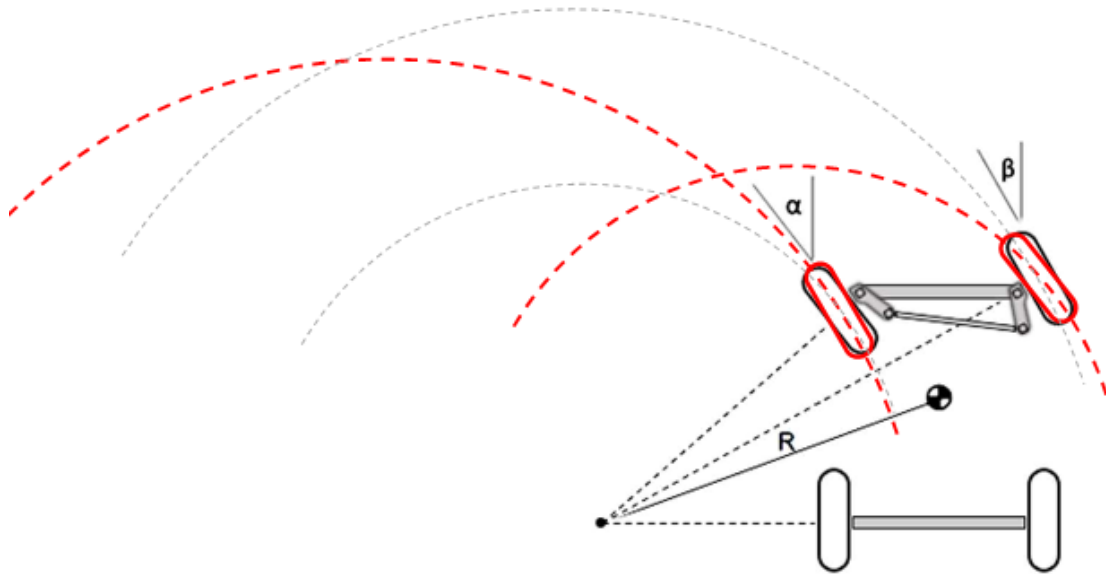
Após a desmontagem, foi detectado que quando se vira o volante, quer para a esquerda quer para a direita, a roda que curva mais é a roda do lado exterior da curva, contrariamente ao esperado. Para perceber o que poderá estar errado, aborda-se a geometria de Ackerman, cujo esquema se mostra na Figura 79.



**Figura 79 - Esquema da geometria de Ackerman (adaptado de [158])**

A geometria de Ackerman permite fazer com que uma roda vire mais do que outra (por efeito trigonométrico), ficando todas as rodas com um determinado ângulo de viragem, de forma a que fiquem com a sua perpendicular alinhada com o centro da curva. Esta geometria confere o ângulo certo para cada roda quando um veículo descreve uma curva a baixa velocidade, onde a força

centrífuga tem pouco significado. Na Figura 80 compara-se a trajetória das rodas através da geometria de Ackerman, com a trajetória efectuada através da geometria de origem do Buggy.



**Figura 80 – Comparação da trajetória das rodas: a cinza, geometria de Ackerman; a vermelho, a geometria de origem**

Segundo Rajamani [159], os ângulos de viragem das rodas frontais ilustrados na Figura 79, podem ser determinados através das seguintes equações.

Para o ângulo alfa:

$$\alpha = \arctan \left( \frac{L}{R + \frac{T}{2}} \right) \quad (49)$$

E para o ângulo beta:

$$\beta = \arctan \left( \frac{L}{R - \frac{T}{2}} \right) \quad (50)$$

Convém referir que para velocidades mais elevadas, a força centrífuga obriga a algum escorregamento dos pneus, o que alarga a trajetória em relação à descrita pela geometria de Ackerman. Nesse caso o

condutor (que atua como um sistema em malha fechada) impõe, através do volante, a trajetória necessária para descrever a curva. Essa trajetória é percorrida com um ângulo que é a soma do ângulo de Ackerman com o ângulo de escorregamento (*slip-angle*).

Na competição automóvel a geometria de Ackerman é um tema bastante controverso e não existe uma receita ideal, há peritos que defendem mesmo o “antiAckerman” [160]. Em velocidades mais elevadas, ao curvar existe transferência de massa para a roda do lado exterior da curva, assim esse pneu vai estar sujeito a um escorregamento maior do que o do lado interior. Por esse motivo, muitos dos carros atuais usam uma geometria de Ackerman modificada, de forma a compensar este fenómeno.

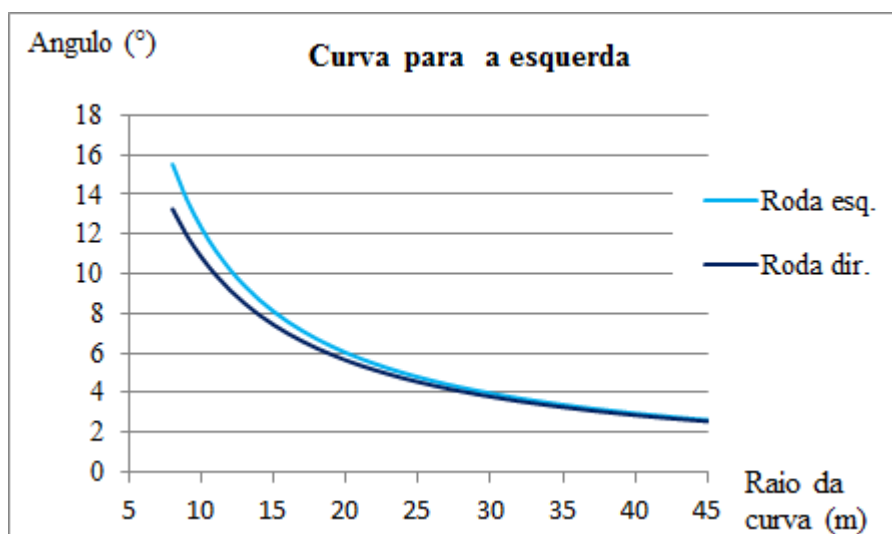
Voltando ao problema, o cubo é uma única peça, construída por fundição, que apoia e fixa a mola e o amortecedor, bem como o braço onde está acoplada a rótula da ponteira da direção. Assim, a solução passa por trocar os cubos das rodas dianteiras: o da direita para a esquerda, e o da esquerda para a direita. Desta forma a coluna de direção pode ser colocada numa parte anterior ao eixo, contribuindo assim para uma mais correta viragem em curva, eliminando o desgaste desnecessário dos pneus, melhorando a resposta do veículo em curva e a facilitando o controlo do veículo por parte do condutor. A imagem da Figura 81 mostra, a cor vermelha a posição de origem e a cor verde a posição sugerida para a coluna de direção.



**Figura 81 – Proposta de alteração da coluna de direção (a vermelho a posição original incorreta; a verde a posição sugerida para corrigir o ângulo de Ackerman)**

No entanto verifica-se que não terá uma geometria puramente de Ackerman, pois o braço do cubo que liga à ponteira de direção parece estar ligeiramente desalinhado com o centro do eixo traseiro. A alteração não chegou a ser implementada no carro.

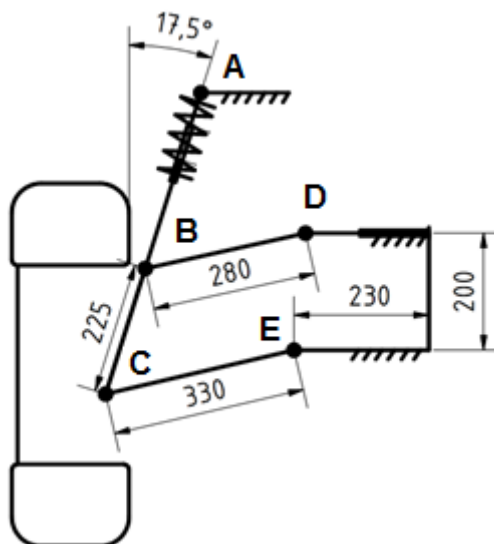
Por curiosidade, mostra-se o gráfico dos ângulos de viragem das rodas (Figura 82), para o carro em estudo, caso este possuísse a geometria Ackerman.



**Figura 82 – Ângulo de viragem de cada uma das rodas da frente para uma geometria de Ackerman**

Quando se vira o volante, quer para a esquerda quer para a direita, a roda que curva mais é a roda do lado interior da curva, se a curva tender para o infinito (aproximando-se de uma reta) as duas rodas tendem a ficar alinhadas.

Um outro problema foi detectado na suspensão da frente, do tipo McPherson, que conforme se coloca carga (comprimindo as molas), o alinhamento da direção torna-se bastante divergente. Fez-se um esquema representativo dessa suspensão, com as principais medidas, de forma a perceber o problema, como se ilustra de seguida (Figura 83). A suspensão tem um curso máximo de 60mm.



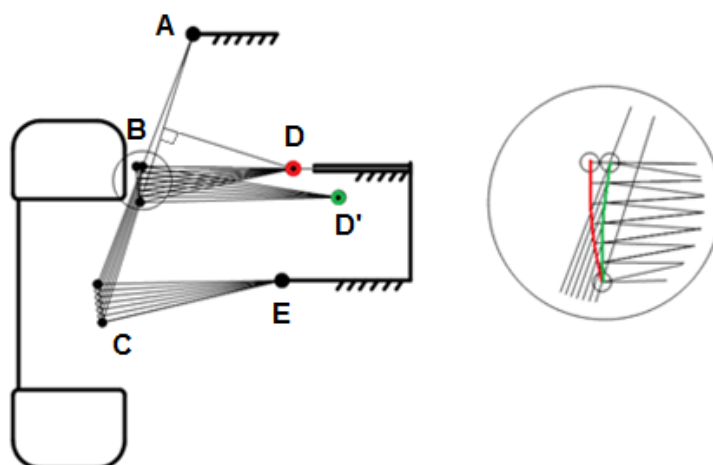
**Figura 83 - Esquema da suspensão de origem**

As medições foram feitas com a suspensão montada, pelo que as medidas reais poderão ter ligeiras diferenças. Uma forma de obter mais rigor métrico, seria desmontar todas as peças, de forma a ter acesso às rótulas, e assim obter as dimensões com maior exatidão.

Num sistema ideal, as trajetórias das barras articuladas da direção não devem alterar a direção das rodas. Isto é, a suspensão deve filtrar uma irregularidade do terreno mantendo o ângulo de cada roda imposto pelo sistema de direção.

Na Figura 84 mostra-se o esquema da trajetória que a ponteira de direção ( $\overline{BD}$ ) descreve em torno do centro D, e o centro ideal (ponto D'). Quando as molas da suspensão estiverem comprimidas até ao batente, a trajetória da rótula (B) não acompanha o movimento de  $\overline{AC}$ . O que faz com que o eixo do amortecedor gire e provoque uma divergência na roda correspondente a  $6,28^\circ$ .

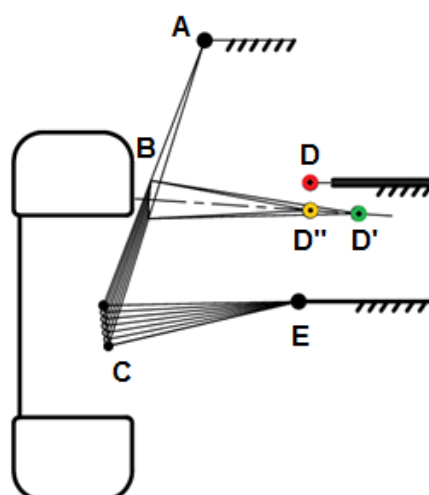




**Figura 84 - Esquema das trajetórias: de origem, em torno da rótula (D) e ideal em torno da rótula (D')**

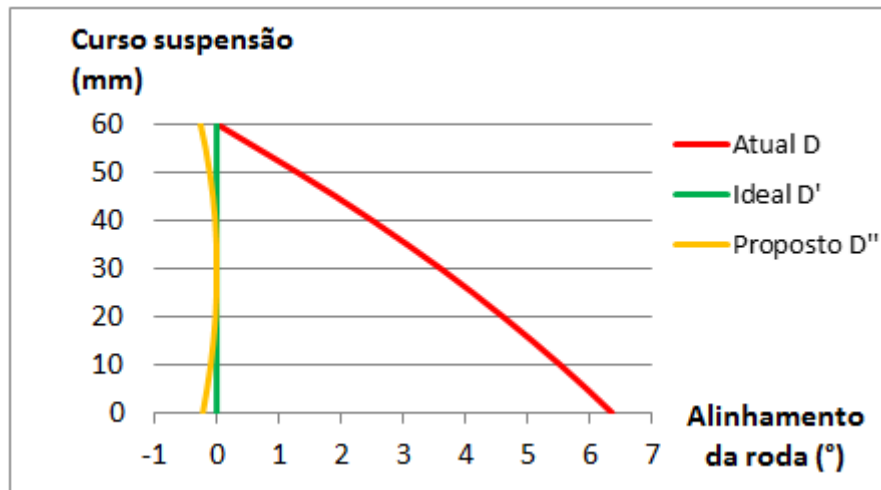
Para que o sistema pudesse obedecer à trajetória ideal, seria necessária uma nova coluna de direção, mais curta e uma nova ponteira de direção, mais comprida. No entanto, pode ser arranjada uma solução bastante razoável aproveitando as peças existentes.

A coluna de direção possui no seu interior uma cremalheira de raio infinito, logo não convém ser cortada. A ponteira de direção tem uma zona roscada para afinação que a torna bastante adaptativa. Além disso, facilmente se pode cortar e fazer extensão dos filetes de rosca na zona cortada. Assim, sugere-se que se mantenha a mesma coluna de direção mas deslocando-a para a linha de ação da trajetória ideal como se mostra através do ponto D'' na Figura 85.



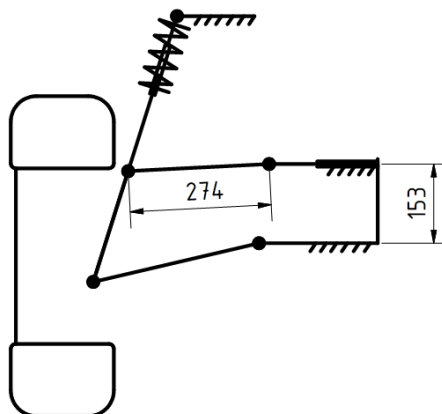
**Figura 85 - Esquema das trajetórias, ideal em torno do ponto D' e da solução problema em torno do ponto D''**

A trajetória da ponteira de direção em torno deste novo ponto (D''), quando a suspensão se encontra a meio do seu curso, é coincidente com a trajetória em torno do ponto ideal (D'). Conforme a suspensão se desloca para os extremos a trajetória desvia-se 0,43mm, o equivalente a uma convergência da roda de 0,25° o que parece aceitável pois numa situação de condução normal raramente a suspensão “bate” nos extremos. O gráfico seguinte (Figura 86) mostra a variação do alinhamento da roda em relação à variação da suspensão.



**Figura 86 – Variação do alinhamento da roda com o curso da suspensão.**

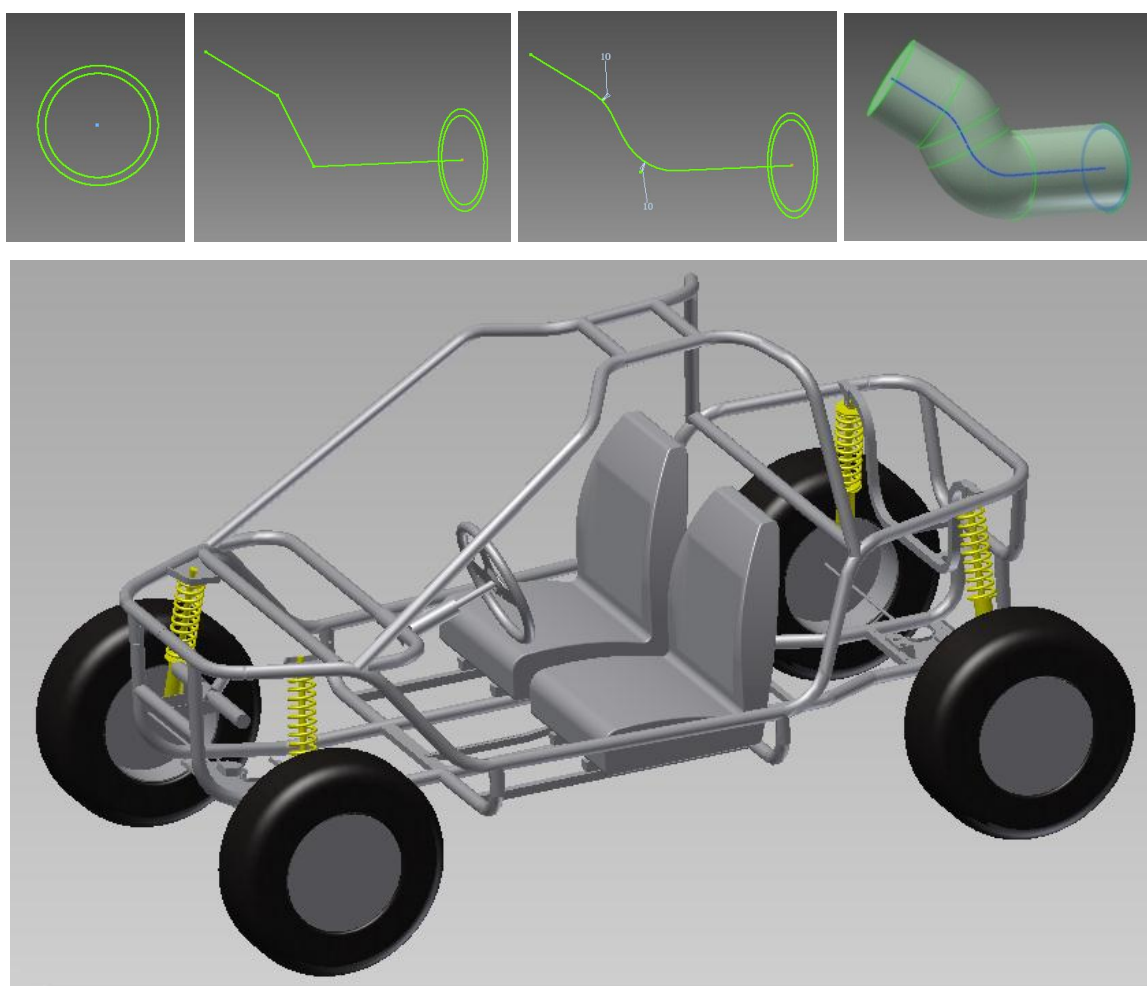
Para concretizar a solução exposta, a posição da caixa de direção deverá ser colocada a 153mm acima do eixo do triângulo inferior da suspensão (como mostrado na Figura 87), cujas articulações devem estar paralelas ao plano formado pelos eixos dos amortecedores. A ponteira de direção deve ter um comprimento de cerca de 274mm, e deverá ter afinação para posterior alinhamento de direção.



**Figura 87 - Esquema da posição da direção com a solução adoptada.**

#### 4.1.2 Desenho 3D da estrutura para atravancamento do motor e das baterias

Foi elaborado um desenho 3D da estrutura, em *Inventor*, de forma a facilitar o posicionamento das baterias e do motor. Para desenhar a estrutura tubular, começa-se por “abrir” um esboço 2D onde se desenha o perfil do tubo. Seguidamente “abre-se” um esboço 3D, e com o comando “linha” coloca-se o primeiro ponto no centro do perfil (já desenhado em 2D), o segundo ponto foi introduzido através da inserção das coordenadas X,Y,Z e assim sucessivamente, criando uma “estrutura de arame” (*wireframe*). O valor das coordenadas inseridas é sempre em relação ao último ponto. Após terminada a “estrutura de arame”, arredondam-se os vértices com o comando “concordância” e fecha-se o esboço 3D. Posto isto, através do comando “varredura” procede-se à “extrusão” do perfil (criado em 2D) seguindo o caminho (fio de arame 3D) como se mostra na sequência das imagens da Figura 88.



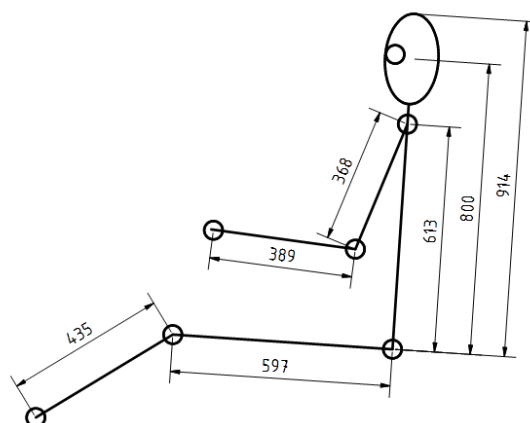
**Figura 88 - Sequência de desenho 3D da estrutura, em Inventor**

A estrutura de origem é separada por parafusos em três partes, por forma a facilitar o transporte e envio para os clientes mais distantes.

O sistema de suspensão não foi desenhado. As rodas estão fixas por uma barra auxiliar, apenas para permitir obter a sua posição real. Isto porque o principal objectivo deste desenho é ter uma noção do espaço disponível para colocação do motor e das baterias. Assim falta ainda saber o espaço ocupado pelos ocupantes, tema que se trata a seguir.

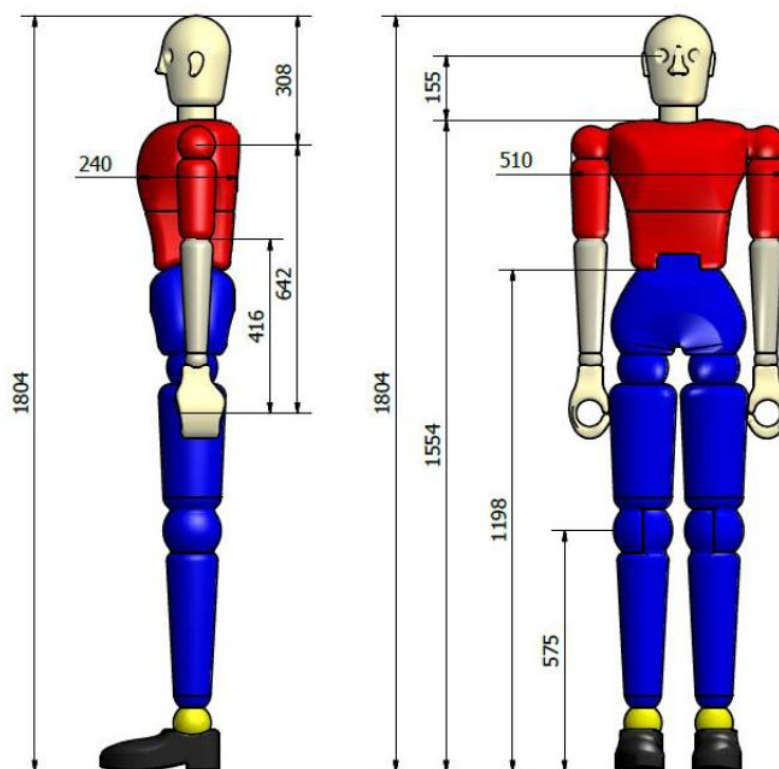
#### **4.1.2.1 Medidas antropométricas**

Arezes *et al.* [161], elaborou um estudo das medidas antropométricas mais representativas para pessoas de vários países (Reino Unido, polónia, Holanda e Portugal), quer do sexo feminino quer do sexo masculino. Com base nesse estudo, procedeu-se à elaboração de um esboço que ajudou a definir o espaço dos ocupantes dentro do veículo, como se mostra Figura 89. Isso veio facilitar a noção espacial para a colocação das baterias e motor.



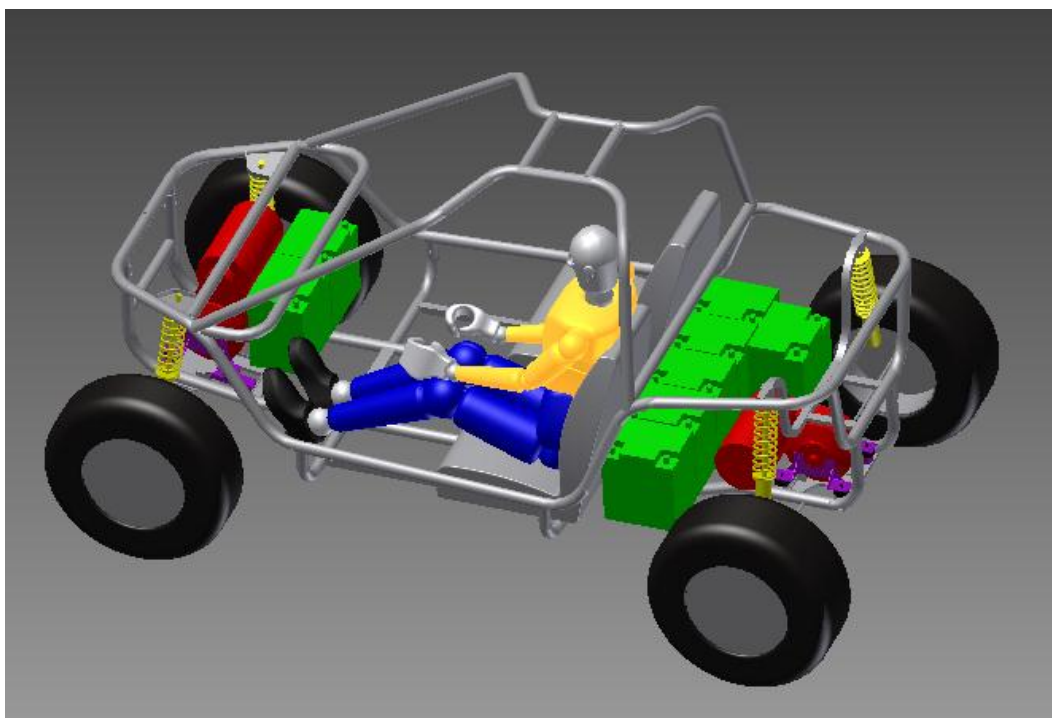
**Figura 89 - Esquema do modelo antropométrico**

Entretanto foi cedido um *dummie* chamado Tobias (Figura 90), projetado pelo Eng. José Fecheira, que o havia elaborado para o percentil 95 das medidas antropométricas da população Portuguesa [162].



**Figura 90 - Dummi (Tobias) [162]**

Na posse deste *dummi* (gentilmente cedido pelo seu autor), e com as medidas do motor e das baterias usadas na empresa SMS, fez-se um estudo relativamente à sua melhor localização no veículo. Para além de questões de atravancamento e do centro de gravidade, existiu a preocupação verificar se a posição da caixa redutora do eixo traseiro (inclinada) não poderia comprometer a sua lubrificação normal. Assim, e em sintonia com os conselhos da empresa, chegou-se ao desenho da Figura 91.

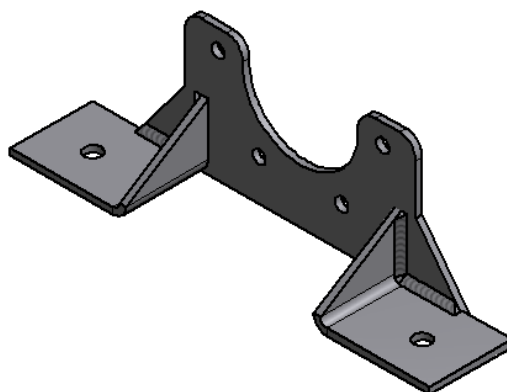


**Figura 91 - Desenho 3D do veículo com localização proposta para o motor, baterias e passageiro**

Foram desenhados suportes para a caixa redutora que está solidária com o motor (previamente fixo por parafusos à caixa redutora). Esses suportes foram dimensionados à fadiga através de simulação em *Inventor*.

#### **4.1.2.2 Dimensionamento dos suportes da caixa redutora à fadiga**

A caixa redutora é suportada por dois suportes iguais, como o que se mostra na Figura 92. O suporte foi desenhado para construção em chapa quinada e posteriormente soldada.



**Figura 92 - Desenho 3D do suporte do conjunto: caixa redutora, diferencial e motor**

Para que esta peça não entre em rotura durante a vida útil do veículo, deve ser dimensionada à fadiga. O carregamento deste suporte é provocado maioritariamente, pelas acelerações e desacelerações, curvas e irregularidades do pavimento, como se verá mais à frente.

Branco, no capítulo 14 do seu livro [163], refere métodos de dimensionamento de peças à fadiga que serão usados para dimensionar o referido suporte. Começando pela equação da tensão admissível à fadiga  $\sigma_f$ :

$$\sigma_f = (k_s \times k_t \times k_{fi} \times k_T) \times \frac{1}{K_f} \times \frac{1}{n} \times \sigma_{f0} \quad (51)$$

Onde as variáveis representam:

$k_s$  – Coeficiente de acabamento superficial

$k_t$  – Coeficiente de tamanho

$k_{fi}$  – Coeficiente de fiabilidade

$k_T$  – Coeficiente de temperatura

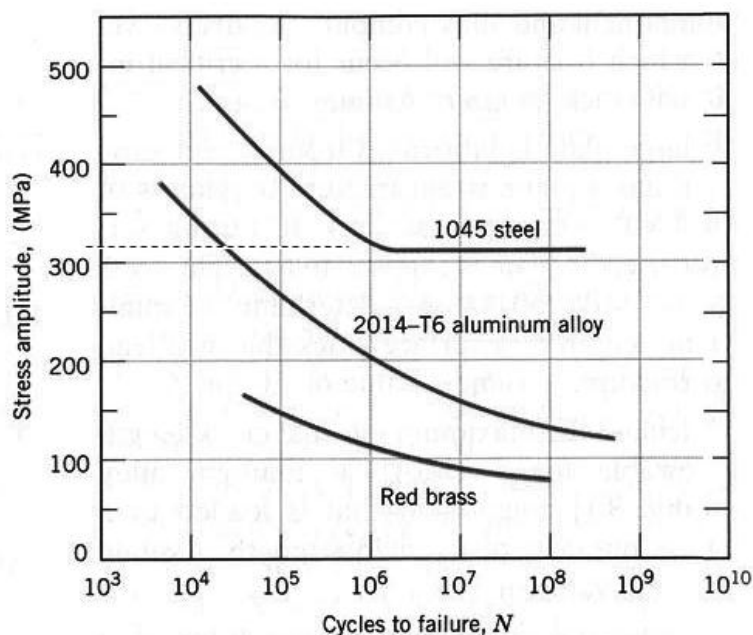
$K_f$  – Fator de concentração de tensões

$n$  – Coeficiente de segurança dinâmico

$\sigma_{f0}$  – Resistência à fadiga para o número de ciclos dado pela curva S-N

O coeficiente de acabamento superficial, segundo o gráfico da página 940 (do mesmo livro), para chapa de aço laminado com tensão de cedência de 530 MPa, estima-se em 0,65. Para o parâmetro relativo ao tamanho assume-se o valor  $k_t=1$  (p. 962). Para uma fiabilidade de 95% o fator  $k_{fi}$  assume o valor de 0,843 (p. 963). Como o suporte não sofrerá temperaturas superiores a 70° C então  $k_T=1$  (p. 964). O suporte não apresenta entalhes, então pode considerar-se o fator  $K_f = 1$ . Para o coeficiente de segurança dinâmico foi atribuído o valor de  $n=1,5$  (choques moderados página 968). A resistência à fadiga  $\sigma_{f0} = 320$  MPa foi estimada através da curva S-N do gráfico abaixo.

Para um aço, a tensão limite de fadiga ocorre para  $10^7$  ciclos, isto é, se o material não falha durante esse número de ciclos, então diz-se que tem vida infinita (p. 928).



**Figura 93 - Curva S-N para o aço AISI 1040 norma equivalente à DIN Ck45 [107]**

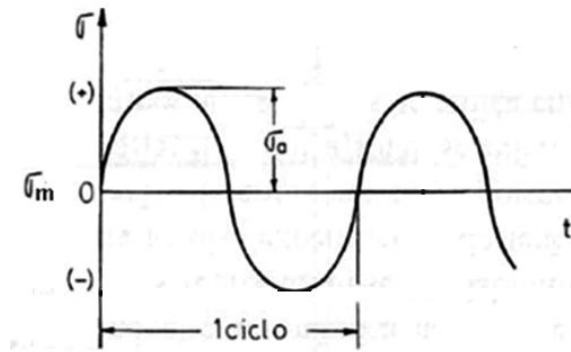
Esta tensão limite de fadiga ( $\sigma_{f0}=320\text{MPa}$ ) é afectada pela influência dos ciclos de carregamento. O carregamento deste suporte é provocado por acelerações longitudinais, transversais e verticais.

O arranque e a paragem são maioritariamente responsáveis pelas acelerações longitudinais e provocam um carregamento irregular alternado, no sentido longitudinal (X). O carregamento é alternado, pois por cada aceleração terá de haver uma desaceleração e por cada subida percorrida também existirá uma descida. Este carregamento, apesar de irregular, pode ser considerado cíclico.

Quando o carro percorre as curvas de uma estrada, produz acelerações transversais alternadas, portanto também é um carregamento irregular alternado, por cada curva que o automóvel faça à esquerda, existirá posteriormente uma curva à direita. Também se considerará um carregamento cíclico que atua no sentido transversal (Y).

A presença de imperfeições no piso da estrada (apesar de filtradas pelos pneus e pelos amortecedores), bem como a própria massa do motor, representam um carregamento no sentido vertical (Z). Este carregamento é do tipo repetido pulsante, mas será tratado como alternado constante (esquematizado na Figura 94) por produzir um cálculo mais conservador.





**Figura 94 – Ciclo de tensão de fadiga alternado de tensão constante [163]**

Dos carregamentos descritos e do gráfico acima, vem  $\sigma_m=0$ , então a tensão admissível  $\sigma_a=\sigma_{f0}=320\text{MPa}$ .

Substituindo todos os valores na equação (51), fica:

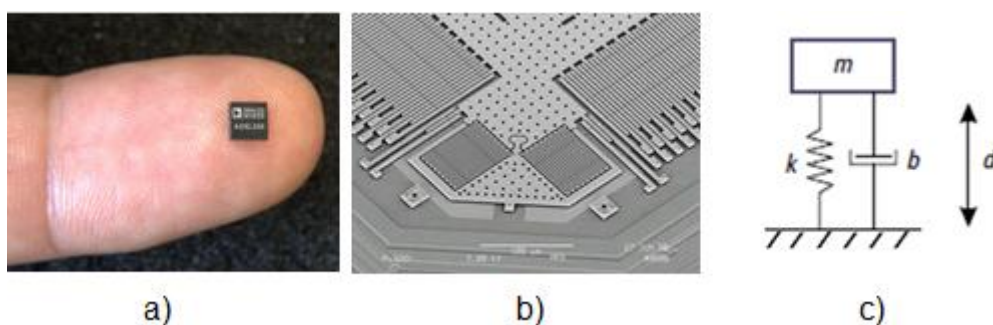
$$\sigma_f = 0,65 \times 1 \times 0,843 \times 1 \times \frac{1}{1} \times \frac{1}{1,5} \times 320 \approx 117\text{MPa} \quad (52)$$

Este valor (117Mpa), vai ser usado mais à frente neste dimensionamento. Aqui faz-se um parêntesis para estimar o valor das forças a que o suporte está sujeito.

Uma forma de obter o valor dessas forças exercidas no suporte, seria dimensionar para o limite de exposição a vibrações transmitidas ao corpo humano. A norma ISO 2631 contempla valores aplicáveis num projeto de assento para passageiros, níveis de frequência e tempos de exposição.

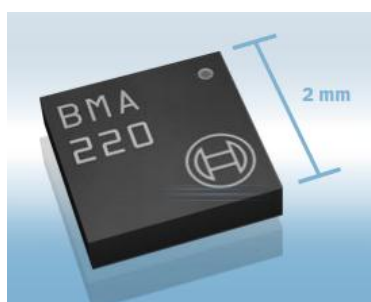
Outra forma seria recorrer a medições, feitas em percursos típicos, através de acelerómetros, nas três direções, longitudinal, transversal e vertical.

O micro sensor inercial (ou acelerómetro) usa uma tecnologia denominada de MEMS (*Microelectromechanical systems*) que apresenta uma tecnologia de construção baseada na deposição de filmes finos. Na imagem da Figura 95(b) pode ver-se os *fingers* (que se assemelham a teclas de piano) são finíssimas barras que servem de molas de flexão e suportam uma pequena massa na extremidade, em consola. Se existir uma aceleração, estas massas suspensas deslocam-se por causa da sua inércia e esse deslocamento é registado através de micro condensadores, como se mostra na imagem da Figura 95(c).



**Figura 95 – a) aspeto exterior de sensor inercial (acelerómetro), b) pormenor construtivo [164], c) esquema de funcionamento**

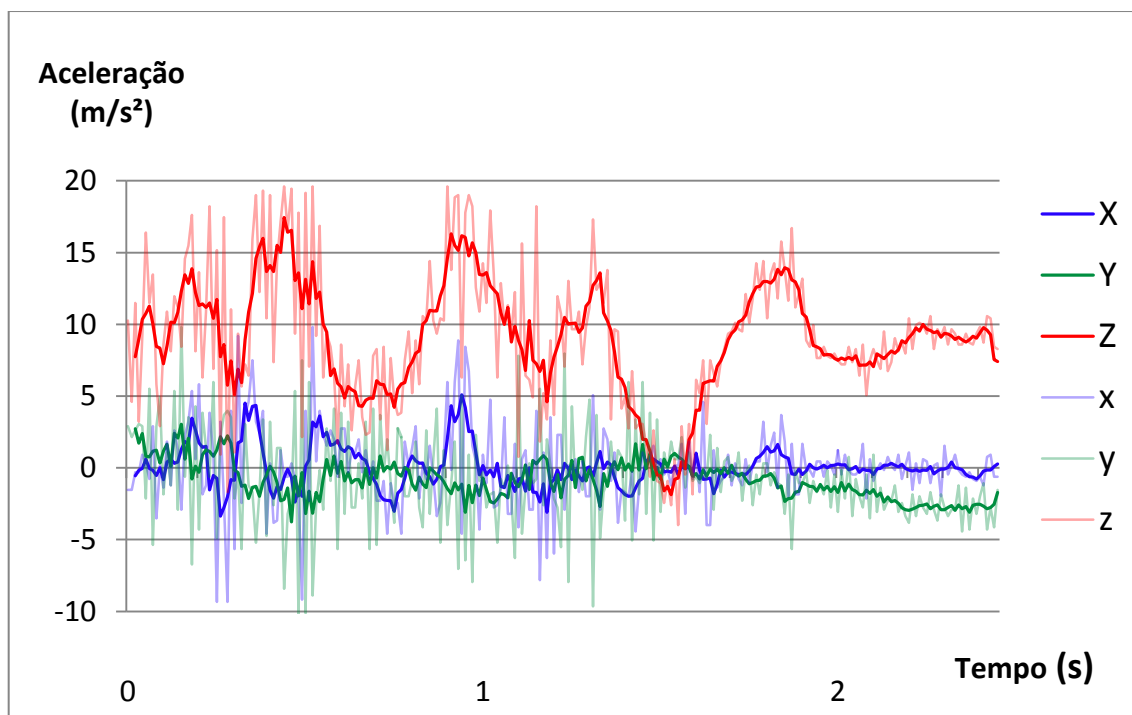
Foram realizadas medições, nas três direções (X,Y,Z), para tal recorreu-se a um *smartphone* da marca Samsung Galaxi Mini, cujos acelerómetros são da marca Bosch Sensortec BMA 220 (Figura 96), e cujas características podem ser consultadas na página do fabricante [165] .



**Figura 96 – Sensor inercial Bosch Sensortec BMA 220 [165]**

O aparelho foi colocado no fundo do porta-bagagens do carro, fixo à estrutura do carro com fita adesiva. O veículo usado foi um Seat Ibiza TDI, que percorreu um trajeto onde foi possível realizar manobras típicas para estas medições. Foram respeitados todos os limites rodoviários, bem como outras regras de segurança.

Apresenta-se na Figura 97 um excerto de um dos gráficos (não há espaço para mostrar todos), cujos valores foram captados num pavimento em paralelo granítico com lombas, a uma velocidade de cerca de 40 km/h. As cores mais esbatidas correspondem aos dados adquiridos diretamente do aparelho. As cores mais vivas correspondem aos mesmos dados depois de filtrados em Excel. O filtro usado foi uma média móvel de cinco medições consecutivas (duas anteriores, duas posteriores e a própria) para todas as acelerações, longitudinal, transversal e vertical.



**Figura 97 - Gráfico de acelerações, transversais X, longitudinais Y e verticais Z (as cores mais vivas representam os valores depois de filtrados)**

Em síntese, os valores máximos obtidos para os vários tipos de manobras realizadas podem ser lidos na coluna “Teste” da Tabela 12. Esses valores podem ser comparados com os valores de referência (coluna da direita), usados num projeto de dimensionamento de um suporte de motor para os carros Ford Focus e Peugeot 206 [166].

**Tabela 12 – Valores de aceleração máxima medidos no teste, na segunda coluna e valores referidos em [166], na terceira coluna**

Manobra	Aceleração (g)	
	Teste	Referência
Lomba (vertical)	1,8	3,4
Curva (Transversal)	1,1	1,0
Travagem (Longitudinal)	1,0	0,9
Aceleração (Longitudinal)	0,7	0,45

Para um primeiro contacto com este tipo de testes, onde ainda não existe muita confiança (quer em procedimentos quer em instrumentação), os resultados apresentados são bastante satisfatórios. A

principal diferença entre os valores de teste e os valores de referência encontra-se no valor do eixo vertical e revela que os testes na indústria automóvel são seguramente realizados em pavimentos mais degradados, contudo são condições muito severas e não ocorrem todos os dias. Uma outra disparidade, na aceleração longitudinal, justifica-se por ter sido usado no teste um carro de cariz relativamente mais desportivo do que os carros do projeto de referência.

As forças no eixo X, causadas quer pela aceleração, quer pela desaceleração do automóvel, estão limitadas ao atrito dos pneus. O automóvel em questão poderá contemplar várias motorizações, quaisquer que sejam, não possuirão uma aceleração (em modulo) superior à da travagem. Assim, para os cálculos será usada a força devido à travagem.

Como nesta fase ainda não se sabe muito sobre o comportamento do veículo, nem o tipo de pneus que irá usar, então sabendo que muitos dos fabricantes de automóveis modernos anunciam uma travagem de 90 até 0 km/h em cerca de 32m, pode estimar-se a força resultante dessa travagem, começando por calcular a aceleração, admitindo um movimento uniformemente retardado:

$$V^2 = V_0^2 + 2 \times a d \quad (53)$$

Onde  $V$  é a velocidade,  $V_0$  é a velocidade no instante inicial (90km/h=25m/s),  $a$  é a aceleração e  $d$  é a distância, então, substituindo os valores referidos acima fica:

$$a = \frac{V^2 - V_0^2}{2 \times d} = \frac{0 - 25^2}{2 \times 32} = -9,77 \text{ m/s}^2$$

Para uma massa do conjunto (motor, caixa redutora e diferencial) de cerca de 40 kg, fica:

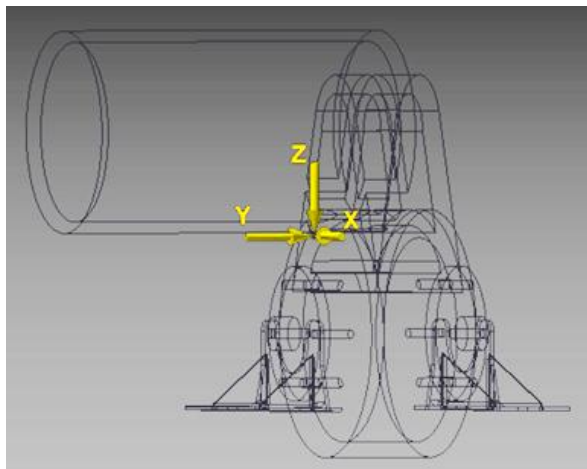
$$|F| = m \times a = 40 \times 9,77 \approx 400 \text{ N}$$

No eixo Y as forças atuantes advêm das curvas, também estão limitadas ao atrito dos pneus (embora a transferência de massa numa curva seja muito diferente da de uma travagem). Estas forças terão um valor que no limite será próximo do valor das forças exercidas durante a travagem.

A força vertical (eixo Z) pode ser estimada através do seguinte raciocínio, para acelerações superiores a 1g os passageiros saltam da cadeira (desprezando os elastómeros do assento) e os pneus deixam de ter contacto permanente com o solo.

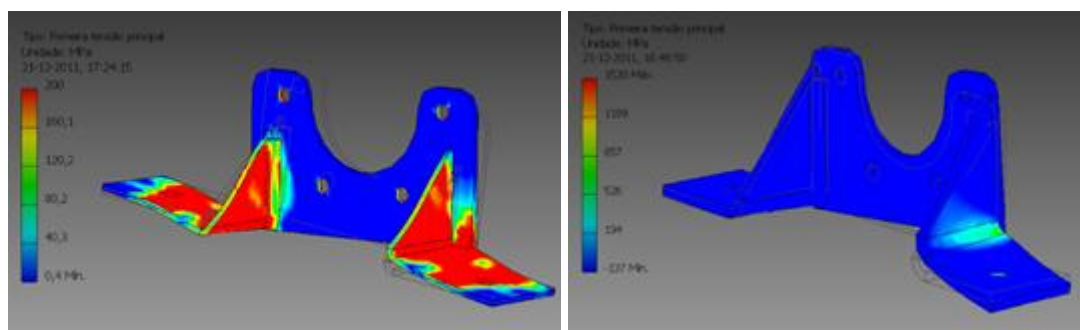
Durante a vida do veículo, poucas serão as situações onde possa acontecer em simultâneo: uma curva muito apertada onde existe uma lomba muito forte e condutor seja forçado a efetuar uma travagem muito brusca. O mais corrente serão situações onde possam existir apenas duas dessas forças ao mesmo tempo, no entanto, para o dimensionamento, aplicar-se-á todas as forças em simultâneo.

As forças são aplicadas no centro de massa do conjunto (motor, caixa redutora e diferencial), na posição longitudinal (X), transversal (Y) do veículo. A Figura 98 representa a aplicação dessas forças e foi elaborada no programa de CAD *Inventor*.



**Figura 98 - Cargas no centro de massa do conjunto: motor, caixa redutora/ diferencial**

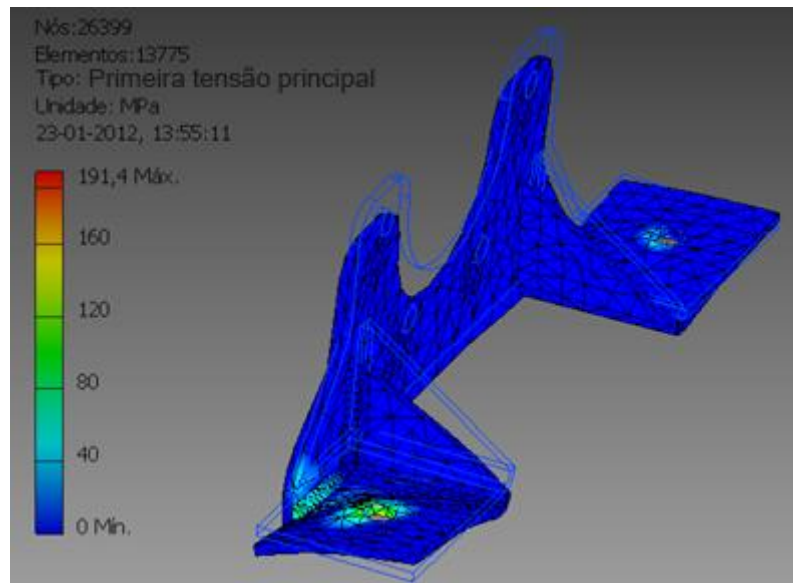
Através do resultado, otimiza-se a peça até que a tensão máxima não ultrapasse a tensão admissível calculada acima  $\sigma_f=117\text{MPa}$ . As imagens da Figura 99 ilustram essa otimização.



**Figura 99 - Resultado da simulação, com chapas de 3 e 5mm, da esquerda para a direita respectivamente**

Durante a fase de otimização, foi-se colocando mais espessura à chapa, de 3 para 4 e 5mm, mas tal não foi suficiente, existindo ainda tensões localizadas na ordem dos 500MPa. Como essa tensão estava confinada a uma pequena parte da peça (a maior parte já possuía tensões admissíveis) então alterou-se a configuração da peça de forma a resolver o problema.

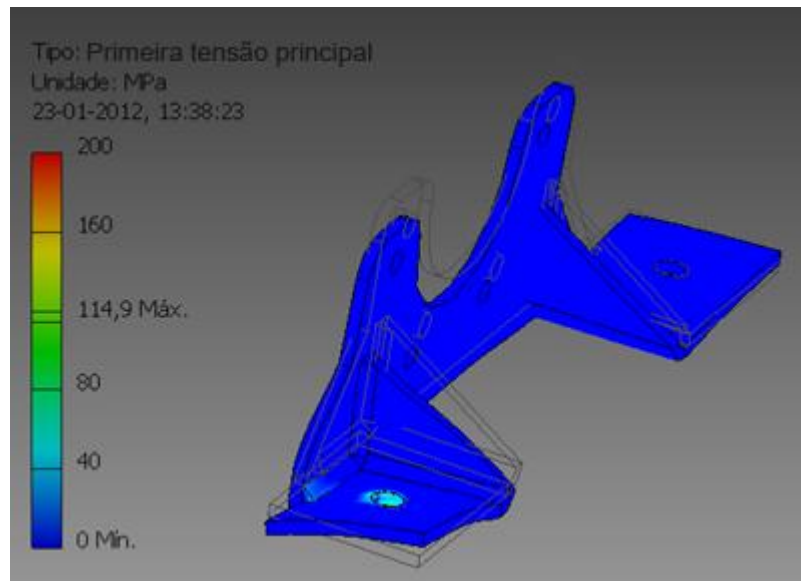
Foi acrescentada uma orelha à flange da peça (Figura 100), recuou-se a nervura de forma a esta poder receber um pequeno cordão de solda e foi retomada uma espessura de 3mm.



**Figura 100 - Resultado da simulação, após redesenhar a peça (recebeu um cordão de solda e a espessura foi diminuída para 3mm)**

Porém o resultado da simulação apresenta uma tensão máxima de 191,4Mpa, que continua a ser superior aos 117Mpa calculados como tensão admissível.

Aumentou-se mais à orelha da flange e acertou-se a espessura em 4mm, conseguindo-se uma tensão máxima de 114,9MPa. Este valor está próximo (ligeiramente mais conservador) do valor admissível à fadiga de 117MPa. A Figura 102 mostra essa simulação.



**Figura 101 - Resultado da simulação, após redesenhar a peça com espessura de 4 mm**

A Peça quando solicitada pelas forças a que foi projetada, pode ter um deslocamento máximo de cerca de 22  $\mu\text{m}$  (valor retirado da simulação).

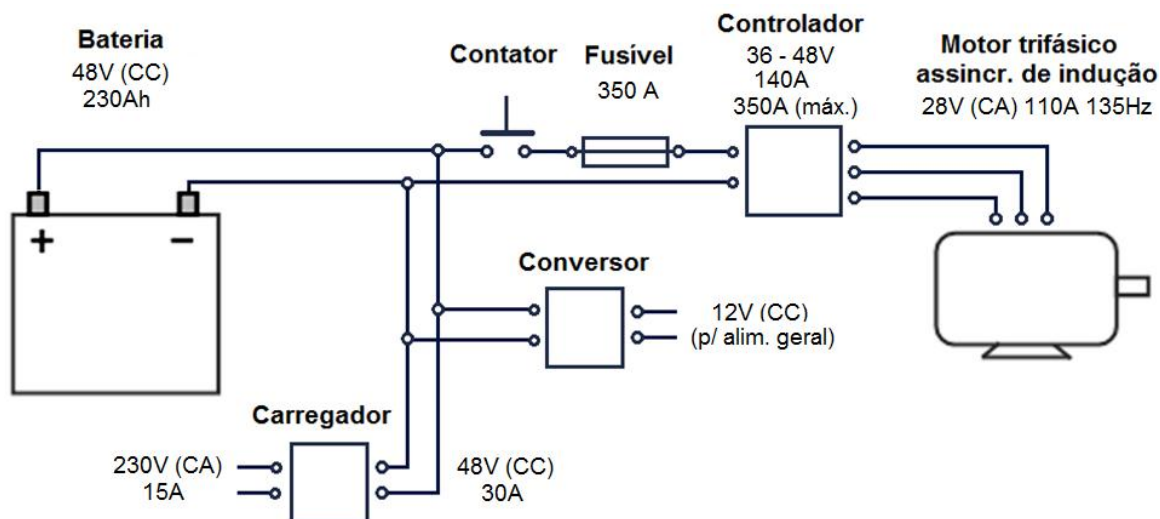
Após estes desenvolvimentos do projeto de conversão do *Buggy* para carro elétrico, por decisão da empresa SMS, não se procedeu à sua implementação prática. O trabalho prosseguiu para a parte da otimização do controlador do Little4.

## 4.2 Otimização dos parâmetros do controlador do Little4

O Little4 é um veículo produzido em Portugal no concelho de Fafe pela empresa SMS. Está homologado como quadriciclo ligeiro. Essa classificação é atribuída através do Decreto-lei n.º 30/2002 que é complementado pelo Decreto-lei n.º 335/2007, para veículos elétricos.

O carro possui um motor de 4kW, tem uma autonomia até 100km (anunciada pelo construtor), pode ter dois ou quatro lugares, bem como tecto aberto ou fechado. Os clientes deste carro são clubes de golfe, hotéis, serviços de entregas de correios, câmaras municipais, empresas de turismo e outros interessados.

Antes de se falar dos parâmetros do controlador, mostra-se um esquema elétrico do Little4, onde pode ver-se as ligações de potência dos órgãos principais (Figura 103). Os valores apresentados são nominais.



**Figura 102 – Esquema elétrico geral do Little4**

O controlador presente no Little4 (Figura 103) funciona com uma tensão nominal entre 36 a 48V. A corrente nominal é de 140 A e a de pico (durante 2 minutos) é limitada ao máximo de 350 A. A frequência máxima de saída do controlador é de 300Hz e o PWM opera a 10kHz. Este controlador é dotado de condensadores para suportar os picos de tensão exigidos pelo motor, e assim atenuar a inércia de resposta da bateria.



**Figura 103 – Controlador da marca Curtis modelo 1236 utilizado no Little4 [167]**

O acesso à programação do controlador pode ter 4 níveis hierárquicos: fabricante (OEM - *Original Equipment Manufacturer*), serviço, revendedor e utilizador. Conforme se desce na hierarquia, o número de parâmetros aos quais se tem acesso fica cada vez mais reduzido.

A lista de parâmetros deste controlador encontra-se no Anexo G. Muitos dos valores para estes parâmetros podem ser encontrados diretamente nas especificações (*datasheet*) dos respectivos



componentes, outros carecem de pequenos cálculos ou ainda de ajustes à sensibilidade do utilizador. De seguida abordam-se alguns destes parâmetros dando maior destaque aos que não constam diretamente no *datasheet* dos órgãos.

#### **4.2.1 Menu *Motor***

Neste menu existe um parâmetro para trocar duas das fases do motor, no caso de, após a montagem o motor estar a rodar em sentido contrário ao pretendido. Aqui especifica-se também a velocidade máxima, podem ser especificados limites estratégicos a operar em modo de falha do *encoder*, como por exemplo de velocidade, corrente e a aceleração.

#### **4.2.2 Submenu *Temperature control***

De forma geral, os parâmetros deste menu restringem a potência do motor quando este atinge uma temperatura elevada, de forma a não danificar o isolamento dos enrolamentos. Caso isso acontecesse significaria a ruína do motor. Os fabricantes geralmente colocam termóstatos (Figura 104), ou sensores de temperatura, de modo a restringir o funcionamento do motor, caso este alcance temperaturas elevadas. O motor do Little4 é dotado de um sensor de temperatura colocado nos enrolamentos de cobre.



**Figura 104 – Colocação de um termóstato nos enrolamentos de um motor elétrico [168]**

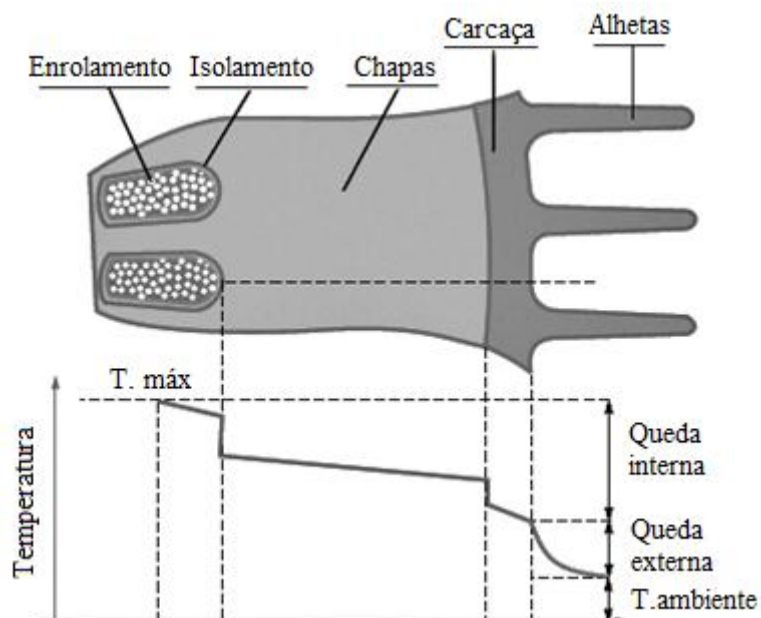
Este menu tem dois parâmetros importantes: temperatura “de alerta” e temperatura máxima. O controlador corta gradualmente a potência desde a temperatura “de alerta” até à temperatura máxima, onde a potência será nula. O motor do Little4 possui a classe de isolamento *F*. Segundo a norma VDE

0530 (que consta na chapa do motor, portanto é a esta norma que a construção do motor obedece), a classe de isolamento F suporta uma temperatura máxima de 155 °C, como indica a Tabela 13.

**Tabela 13 - Classes de isolamento, segundo excerto da norma VDE 0530 [169]**

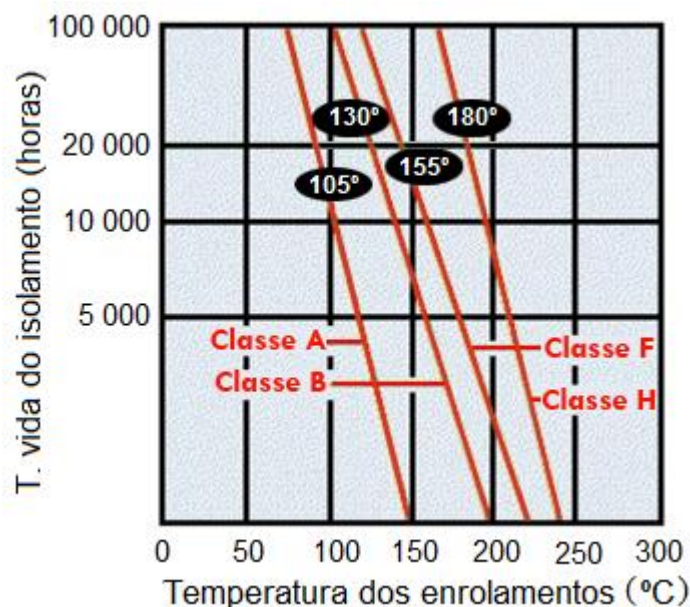
Classe de isolamento	Temperatura máx. (°C)
Y	90
A	105
E	105 - 120*
B	145
F	155
H	180
* Em períodos curtos	

Assim, o parâmetro temperatura máxima deverá ser um pouco inferior a 155 °C e a temperatura “de alerta” será uma temperatura suficientemente inferior a esta, para que a temperatura dos enrolamentos do motor não se aproxime perigosamente da temperatura máxima suportada pelo isolamento. Para se perceber melhor a importância da temperatura no motor, mostra-se o esquema de escoamento de calor desde o enrolamento do estator até às alhetas (Figura 105).



**Figura 105 – Evolução da temperatura no interior do estator de um motor elétrico alhetado [168]**

A norma estabelece uma temperatura máxima para cada classe do isolamento dos enrolamentos de cobre, no entanto conforme aumenta a temperatura a que o isolamento está sujeito, o seu tempo de vida diminui. Essa relação pode ser observada no gráfico da Figura 106, para isolamentos das classes A, B, F e H.



**Figura 106 – Tempo esperado de vida do isolamento em função da temperatura [170]**

Constata-se que se motor do Little4, cuja classe de isolamento é F, for sujeito a uma temperatura máxima de 130° (nos enrolamentos de cobre) poderá ter um tempo de vida de cerca de 20 000 horas.

#### **4.2.3 Menu *Motor control tuning***

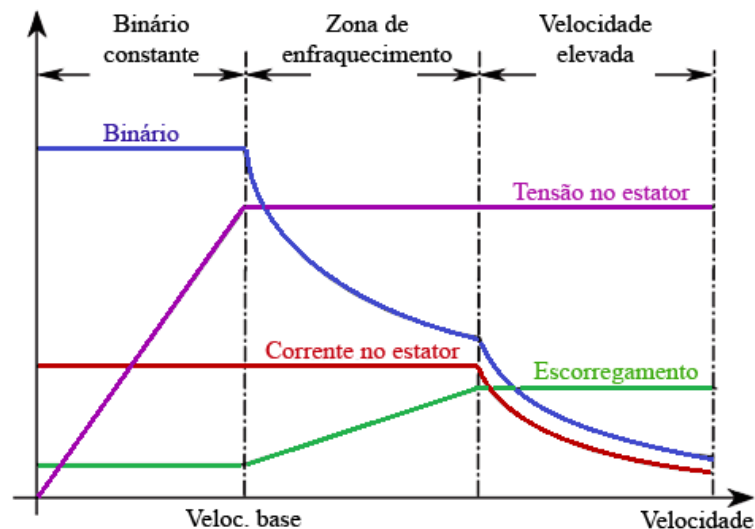
Um dos valores a introduzir neste menu é o escorregamento. Nem sempre o valor é referido pelo fabricante do motor, no entanto este fornece o número de pólos, a frequência e a rotação nominais, com os quais se pode calcular através da equação:

$$s = \frac{N_S - N_N}{N_S} \quad (54)$$

$$N_S = \frac{120 \times f}{p} \quad (55)$$

Onde  $s$  é a percentagem de escorregamento,  $N_s$  é a velocidade de sincronismo (rpm),  $N_N$  é a rotação nominal (rpm),  $f$  é a frequência nominal (Hz) e  $p$  é o número de pólos.

Dentro deste menu existe um submenu, designado de controlo da zona de enfraquecimento (representada na Figura 107). Onde se controla a rotação de início de enfraquecimento, a taxa de enfraquecimento e a corrente mínima nessa zona.



**Figura 107 – Regime de funcionamento típico de um motor de indução [21]**

#### 4.2.4 Menu *Battery*

Aqui pode ser definida a tensão nominal, bem como valores limite acima ou abaixo do valor nominal, a partir dos quais o sistema aciona o corte de corrente, de forma a proteger a bateria e o motor.

Este menu também contém os parâmetros para a tensão, por célula, quando esta se encontra carregada e descarregada, que juntamente com o tempo estimado de descarga e de um valor de *reset*, controlam o indicador de nível de descarga da bateria (no painel de instrumentos). A carga indicada no mostrador (para o utilizador ver) vai até 0%, mas este valor deve corresponder a cerca de 20% da carga da bateria (como se viu na Tabela 9 do subcapítulo 3.1.2), para garantir uma razoável longevidade à bateria.

#### 4.2.5 Menu *vehicle*

É um menu de poucos parâmetros, o mais importante é o valor através do qual o controlador converte velocidade de rotação do motor (rpm) em velocidade do carro (km/h) visível no painel de bordo. A leitura está diretamente relacionada com a caixa redutora e o diâmetro exterior do pneu, pelo que se o veículo possuísse uma caixa de velocidades ou um CVT, teria de ser adaptado um sensor de rotação no veio que está ligado às rodas.

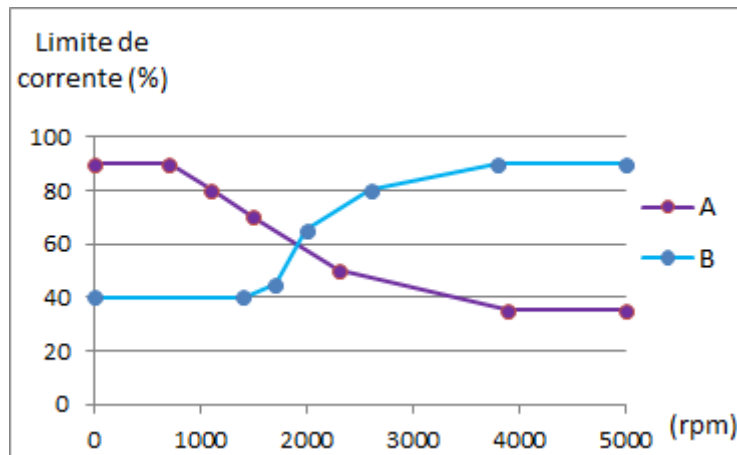
#### 4.2.6 Menu *Current limits*

O limite de corrente é imposto pelo motor, baterias e cabos de ligação, o que tiver o menor valor máximo. Este menu permite o ajuste desses valores para duas situações, travagem regenerativa e abrandamento (também regenerativo) ao retirar o pedal do acelerador. Além disso, dentro deste menu existe um submenu que mapeia os limites para a aceleração e para a regeneração. Uma percentagem do limite de corrente é atribuída a um determinado intervalo de velocidades de rotação. Assim, através da combinação de parâmetros, pode ser obtido o limite de corrente pretendido para a velocidade pretendida. A Tabela 14 mostra dois exemplos dessa combinação.

**Tabela 14 - Exemplo de valores para o mapeamento de limite de corrente**

Exemplo	Base (rpm)	$\Delta$ (rpm)	Corrente (%)				
			Base	Base+ $\Delta$	Base+2 $\Delta$	Base+4 $\Delta$	Base+8 $\Delta$
A	700	400	90	80	70	50	35
B	1400	300	40	45	65	80	90

O gráfico da Figura 108 ilustra o efeito dessa combinação.



**Figura 108 – Mapeamento do limite de corrente**

O mapeamento permite ajustar a corrente máxima disponível para faixas ajustáveis de velocidade, deste modo pode melhorar-se o rendimento do motor, bem como atenuar problemas de arrefecimento. No mapeamento da aceleração, ao restringir a potência a baixa rotação deve ter-se em conta que o veículo deverá poder arrancar (a partir do repouso) num pavimento inclinado. Para se perceber melhor esta questão, faz-se de seguida um pequeno exercício.

O motor do Little4 tem um binário de pico de 65Nm, recorrendo à equação (26), tendo uma relação de transmissão de 9,91 e um raio exterior do pneu de 0,273m, obtém-se a força que a roda exerce no pavimento:

$$F_{te} = \frac{G}{r} \times T = \frac{9,91}{0,273} \times 65 \approx 2360N$$

Igualando esta força à força necessária para transpor um declive, da equação (22), tendo uma massa de cerca de 830kg (680kg do veículo, mais 150kg de dois passageiros), fica:

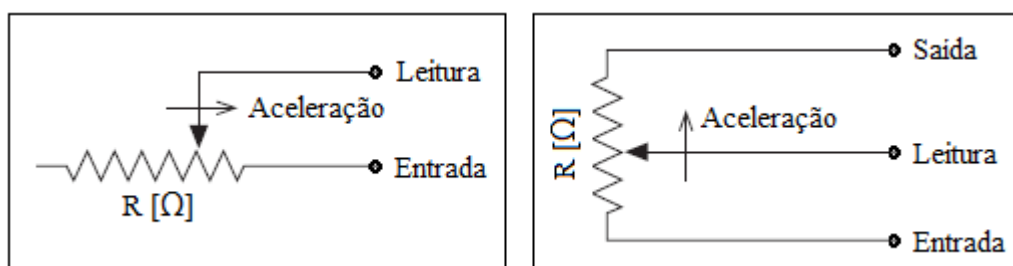
$$2360 = m \times g \times \sin(\beta) \Leftrightarrow \beta = \arcsin\left(\frac{2360}{830 \times 9,81}\right) \approx 17^\circ$$

Teoricamente o carro pode rearrancar num declive até um ângulo máximo de cerca de 17°.

Para a desaceleração existe um outro mapa, igual ao da aceleração, onde se pode controlar o abrandamento quando se retira o pedal do acelerador, onde o motor pode fazer alguma regeneração (sem usar o travão). Isto é útil para segurar o carro nas descidas a baixa velocidade.

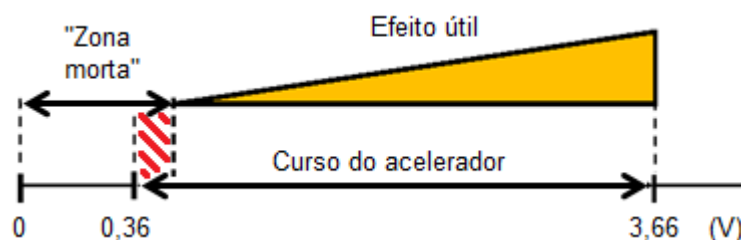
#### 4.2.7 Menu *Throttle*

O controlador permite ajustar o comportamento do acelerador, conforme o tipo de potenciômetro que este incorpora. A Figura 109 mostra o esquema de dois desses tipos de aceleradores.



**Figura 109 – Esquema de aceleradores resistivos de dois e de três terminais [167]**

No Little4, como o acelerador (da marca Bosch) na posição inicial já acusa 0,36V, então o carro entraria em movimento apenas com o rodar da “chave de ignição” (aspas porque este carro não tem ignição). Para que isso não aconteça é definida uma parte inicial da posição do acelerador, cujo efeito é ignorado pelo controlador, denominada de “zona morta”. A partir dessa zona o controlador reage como se o pedal se encontrasse na posição inicial surgindo o efeito útil do acelerador como é esquematizado na Figura 110.



**Figura 110 – Efeito útil da configuração do acelerador**

Por segurança, a “zona morta” deve ser parametrizada até uma tensão ligeiramente mais elevada do que a do início do curso acelerador (zona tracejada a vermelho na Figura 110).

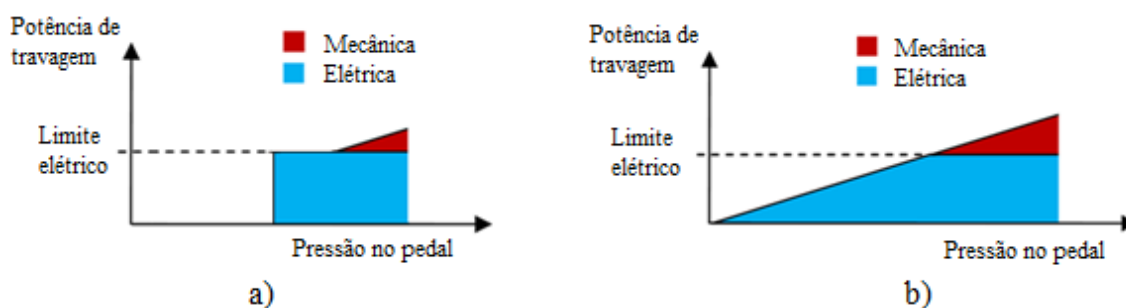
O ajuste da “zona morta” permite a adaptação do controlador aos diferentes tipos de pedais existentes no mercado. Pode ser definida uma “zona morta” no início e no fim do curso do pedal de aceleração, bem como a suavidade com que o pedal opera. Isto pode ser feito de forma independente no caso de se pretender acelerar para a frente ou em marcha-atrás. Do mesmo modo, o controlador possui um

parâmetro para a tensão na posição final do acelerador. Existe também um mapa para a aceleração onde se pode alterar a progressividade do acelerador, que pode ir desde muito suave no início até mais rápido no final do curso, ou ao contrário, tendo vários valores intermédios. Assim podem ser configurados os valores para que se efetuem manobras de estacionamento muito suaves.

#### 4.2.8 Menu *Brake*

É muito semelhante ao menu do acelerador. No caso do Little4 os parâmetros de ajuste e sensibilidade do travão não se aplicam, porque o travão regenerativo é acionado diretamente com o interruptor que liga os farolins de stop (*on-off*). Este funcionamento é muito limitativo pelo que se propõe a implementação de um sensor de posição ou um sensor piezorresistivo. O seu ajuste é possível através da parametrização do controlador, de forma a que o fim de curso elétrico do pedal, possa coincidir com o início de curso mecânico.

Para medir a tensão máxima de saída do sensor, pode ser usado um multímetro da seguinte maneira: coloca-se o travão regenerativo no modo *off* e, com o veículo em movimento, aplica-se lentamente o travão (mecânico) até se sentir um ligeiro efeito de travagem e nesse momento regista-se o valor da tensão. Esse valor seria inserido no parâmetro de tensão para o curso máximo do pedal. O resultado deveria corresponder ao esquema que se visualiza na Figura 111b.



**Figura 111 - Esquema da potência de travagem em relação à pressão no pedal de travão: a) sem sensor; b) com sensor**

#### 4.2.9 Menu *Speed mode express*

Neste menu encontram-se parâmetros de configuração para a rapidez de resposta do acelerador, do abrandamento e do travão, contemplando a agressividade ao toque no pedal e ainda valores



percentuais para a resposta do controlador para manter a velocidade de referência (imposta pelo condutor). Estas configurações devem ter em conta o estilo de condução do cliente alvo, no entanto acelerações rápidas correspondem a menor rendimento do motor, logo menor autonomia.

#### **4.2.10 Menu *Tech studio***

É um menu próprio da empresa Francesa Tech Studio (detentora da licença de construção do Little4) onde constam os submenus: *Boost mode*, *Cruise mode* e *Slow mode*. Todos eles limitam a corrente e a velocidade, quer para a frente quer em marcha-atrás.

### **4.3 Melhorias no funcionamento do Little4**

Após o estudo dos parâmetros do controlador foi possível otimizar o controlo do carro, modificando alguns dos parâmetros por outros mais adequados.

Quando se conduz o Little4 pela primeira vez estranha-se que, basta que se retire o pé do acelerador para que o carro trave bruscamente. Isto acontece porque a travagem regenerativa está alocada ao acelerador. Esse efeito torna-se perigoso (além de desagradável) pois numa viatura que circule atrás do Little4, o seu condutor não verá acender a luz de stop do Little4, pois esta naturalmente só acende com o pedal do travão pressionado. Para resolver este problema foi mudado o valor do parâmetro *Decel rate*, do menu *Speed mode express*, de 5 para 30s e alterado o valor do parâmetro *Brake rate* (do mesmo menu) de 3,5 para 0,5s. A travagem regenerativa passou a ter efeito apenas ao pressionar o pedal do travão. No entanto não é progressiva, e isso deve-se ao facto do pedal de travagem não possuir um sensor de posição, mas apenas um interruptor *on/off*. Para resolver este problema já se propôs uma estratégia na secção 4.2.8.

Notou-se que com o oscilar involuntário do pé no pedal do acelerador (quando se conduz sobre piso em muito mau estado) o motor fica ligeiramente instável. Para contornar este problema foi ajustado o parâmetro *Kp*, do menu *0-Speed Mode Express*, de 30 para 15%, para que o controlador seja mais gradual a implementar a ordem do acelerador.

O escorregamento do motor (parâmetro *slip gain*), foi alterado de 3.3% para 3.7% por se ter verificado que o valor não estava de acordo com os cálculos. Então, para determinar o

escorregamento, recorreu-se aos dados da chapa de características do motor, número de polos, frequência e rotação nominais e através da equação (55) obteve-se a velocidade de sincronismo:

$$N_s = \frac{120 \times 135}{4} = 4050 \text{ rpm}$$

Inserindo a velocidade de sincronismo e a velocidade nominal na equação (54), fica:

$$s = \frac{4050 - 3900}{4050} = 0,037 = 3,7\%$$

Foi alterado o valor do parâmetro *base speed*, presente no menu *Field Weakening Control* de 1350rpm para 2000rpm. Este valor representa o início da zona do enfraquecimento, como mostra o gráfico do motor do Little4 presente no anexo B.

Verificou-se que a velocidade mostrada no velocímetro a bordo não correspondia com a velocidade lida num GPS usado para este fim. Assim, alterou-se o parâmetro *Speed to rpm*, do menu *Vehicle Menu*, de 82.5 para 96.3. Este parâmetro depende da relação de transmissão e do diâmetro do pneu (em cm). O manual do controlador refere a equação para determinar esse fator de conversão [167]:

$$\text{fator de conversão} = \frac{G}{d} \times 530,5 \quad (56)$$

A relação de transmissão  $G$  é de 9.91 (está inscrito na caixa redutora do Little4) e o diâmetro exterior do pneu  $d$  pode ser calculado através da equação (24) cujo resultado é 54,6cm, assim, fica:

$$\text{fator de conversão} = \frac{9,91}{54,6} \times 530,5 = 96,3$$

No mostrador BDI (*battery discharge indicator*) do painel de bordo, observou-se que a percentagem de carga da bateria não correspondia à tensão medida na bateria (relação mostrada na Tabela 9). Além disso, o valor *Empty Volts Per Cell* encontrava-se abaixo do limite mínimo de descarga, o que prejudica a longevidade da bateria. Com base nestes pressupostos, procedeu-se à alteração destes parâmetros como se mostra na Tabela 15.

**Tabela 15 – Registo de alteração de alguns dos parâmetros referentes à bateria**

<b>Parâmetro</b>	<b>Antes</b>	<b>Depois</b>
<i>Reset Volts Per Cell</i>	2,09V	2,18V
<i>Full Volts Per Cell</i>	2,04V	2,12V
<i>Empty Volts Per Cell</i>	1,86V	1,92V
<i>Discharge time</i>	34min	80min
<i>BDI Reset Percent</i>	75%	95%

Os três primeiros parâmetros da Tabela 15 estão relacionados com as características da bateria, os outros dois são parâmetros empíricos. Existe uma relação entre o SoC da bateria e a sua tensão em circuito aberto (como foi referido na Tabela 9) mas com o carro em marcha (circuito fechado) a tensão varia consoante as solicitações do motor, impossibilitando este método para o cálculo do BDI. O cálculo implementado no sistema BDI baseia-se numa tensão da bateria, a partir da qual é considerada totalmente carregada, numa estimativa de tempo de descarga em viagem e num algoritmo que relaciona o SoC com a tensão da bateria. Este algoritmo pode fazer acertos (*reset*) no valor do BDI de cada vez que se “liga a chave de ignição”, pois nesse instante a bateria pode ser considerada em circuito aberto e assim relacionar o valor da tensão com o SoC.

Foi detetado um parâmetro no menu *Encoder Fault Step* que estaria demasiado elevado. Trata-se de *LOS Max Current*, cujo valor estava parametrizado para 400A. Este parâmetro limita estrategicamente o valor de corrente máxima em caso de falha no *encoder* e foi colocado a 110A que é o valor para a corrente nominal do motor. Assim, mesmo sem saber se é o valor ideal, sabe-se que é mais conservador do que o valor anterior, além disso a corrente de pico do motor (fora do modo de falha) é cerca de 320A.

O parâmetro *MotorTemp LOS Max Speed*, que indica ao controlador qual a velocidade de rotação máxima permitida ao motor, para o caso da temperatura do motor ultrapassar a temperatura “de alerta”. O valor foi alterado de 800rpm para 2000rpm, pois pode ocorrer que a temperatura “de alerta” seja ultrapassada apenas ligeiramente e o carro ficaria logo limitado a uma velocidade de cerca de 8km/h como se mostra através do cálculo:

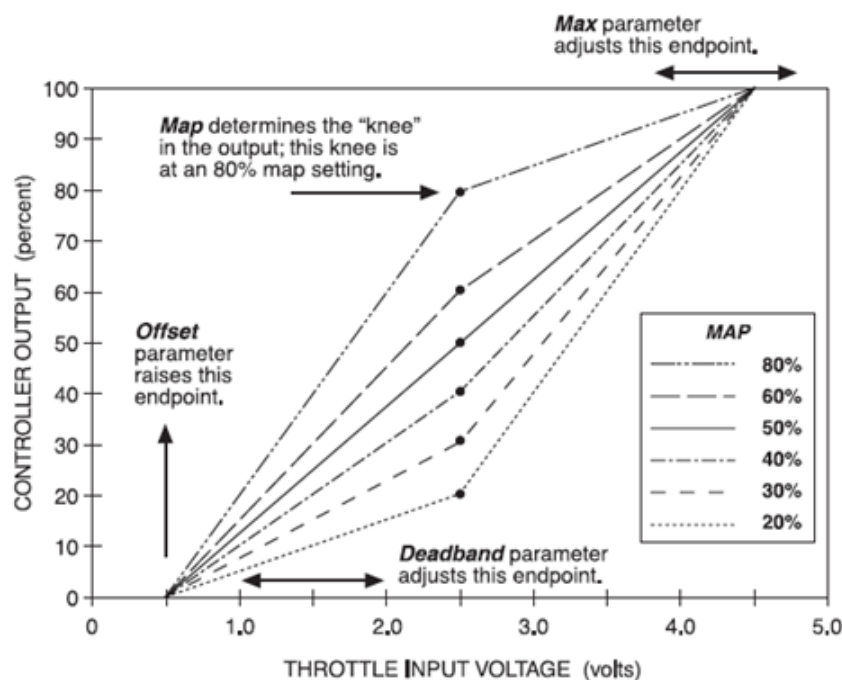
$$V = \frac{\pi \times d \times N}{60 \times G} \quad (57)$$

Onde  $d$  é o diâmetro exterior do pneu,  $N$  é a velocidade de rotação (rpm) e  $G$  é a relação de transmissão, substituindo pelos valores fica:

$$V = \frac{\pi \times 0,546 \times 800}{60 \times 9,91} = 2,3 \text{ m/s} \approx 8 \text{ km/h}$$

Conduzir a 8km/h torna-se embaraçoso para o trânsito. Não há necessidade de descer tanto a rotação, pois caso ocorra a referida temperatura, o controlador limita progressivamente a corrente (subcapítulo 4.2.2) fazendo com que a potência do motor enfraqueça e a sua temperatura volte a descer.

No *Throttle Menu*, através do parâmetro *Forward Deaband*, foi reduzida a “zona morta” do acelerador para que não se sinta uma “folga” inicial tão longa. Modificou-se a resposta do acelerador para uma progressão mais suave no início e ligeiramente mais acentuada no final do curso do pedal. Isso foi conseguido alterando o valor do parâmetro *Forward Map* de 50 para 40%, como se mostra na Figura 112.



**Figura 112 – Efeito do ajuste dos parâmetros do acelerador [167]**

O mesmo parâmetro, mas a operar em modo marcha-atrás foi alterado de 50 para 30% de forma a que, em manobras de estacionamento, o condutor possua maior controle sobre o carro.

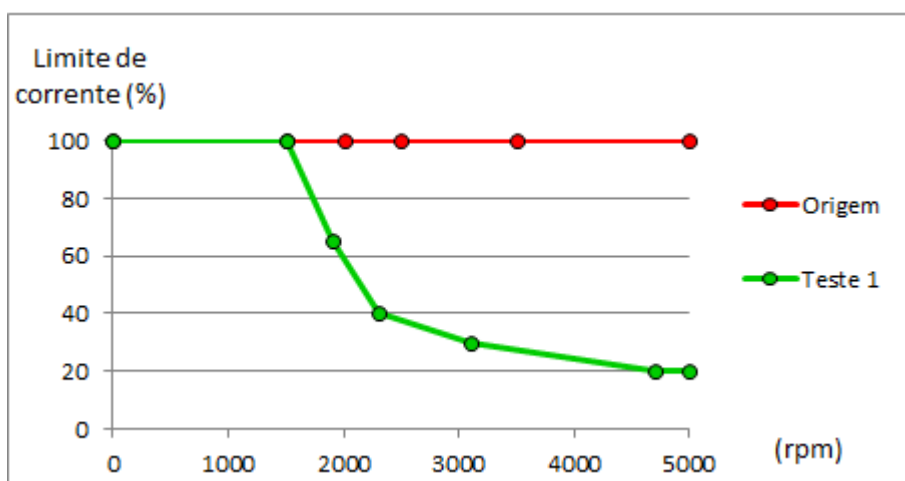
Dentro do *Current Limits Menu* o parâmetro *Brake Current Limit*, responsável pela travagem regenerativa, foi aumentado de 50 para 100%. Este valor corresponde à percentagem da taxa nominal do controlador (140Ah), ou seja 100% corresponde a uma capacidade de regeneração de 140Ah. Esta corrente está dentro do limite tolerado pelo motor e baterias, tendo em conta que travagens bruscas só ocorrerão em curtos períodos de tempo. A corrente de pico do motor situa-se nos 320A (durante 5 minutos) e as baterias possuem uma capacidade nominal de 230Ah e um CCA (*Cold Cranking Amp*) de 940A.

Nos parâmetros que constam do submenu *Driving Limiting Map* do Menu *Current Limits* foram reajustadas as faixas de velocidade e a percentagem de corrente máxima disponível para cada uma, como se mostra na Tabela 16.

**Tabela 16 – Alteração dos parâmetros referentes ao menu *Driving Limiting Map***

<b>Parâmetro</b>	<b>Origem</b>	<b>Teste 1</b>
<i>Base Speed</i>	1500 rpm	1500 rpm
<i>Delta Speed</i>	500 rpm	400 rpm
<i>Nominal</i>	100 %	100 %
<i>Base Plus Delta</i>	100 %	65 %
<i>Base Plus 2xDelta</i>	100 %	40 %
<i>Base Plus 4xDelta</i>	100 %	30 %
<i>Base Plus 8xDelta</i>	100 %	20 %

Deste modo pretendia-se melhorar o rendimento do motor reduzindo o seu aquecimento, tal como foi referido na secção 4.2.6. Os parâmetros apresentados correspondem às zonas de funcionamento que se mostram na Tabela 16.

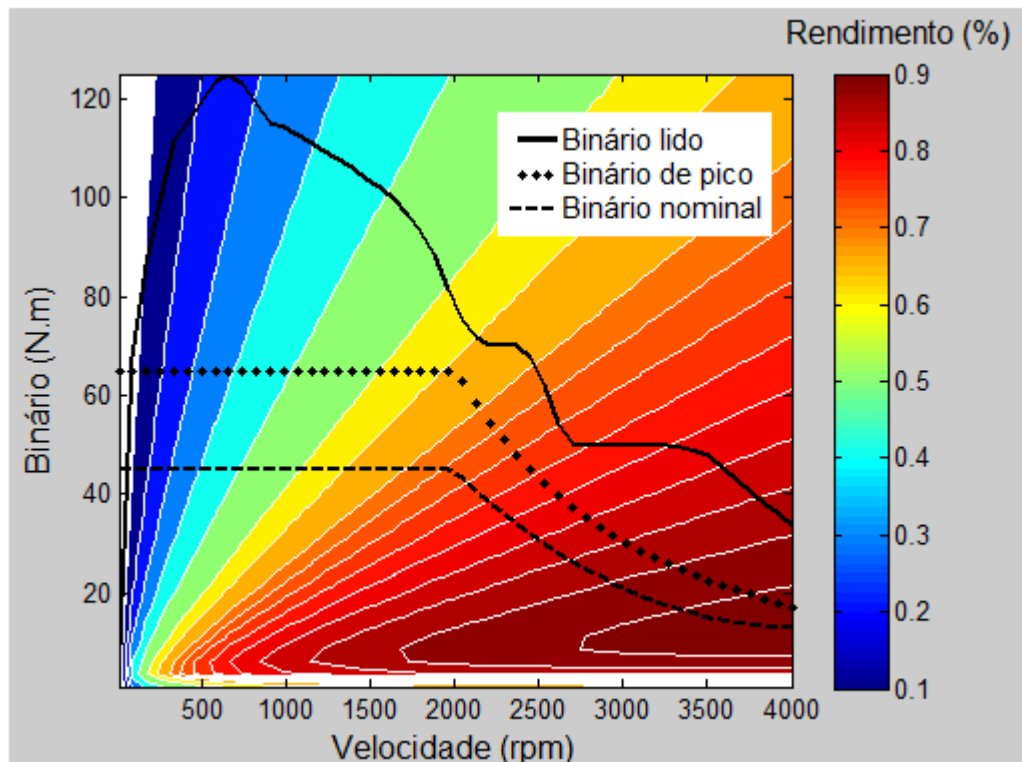


**Figura 113 – Limites de corrente em diferentes zonas de funcionamento, com os parâmetros de origem e do Teste 1**

Para baixas rotações não houve limitação da corrente disponível (além da limitação imposta pelos componentes), para que o arranque do carro se faça mesmo em terrenos inclinados. Para rotações mais elevadas limitou-se progressivamente a percentagem de corrente disponível, de acordo com a zona de enfraquecimento do motor do Little4 (gráfico do fabricante presente no Anexo B), e com a observação da evolução da temperatura do motor durante alguns percursos.

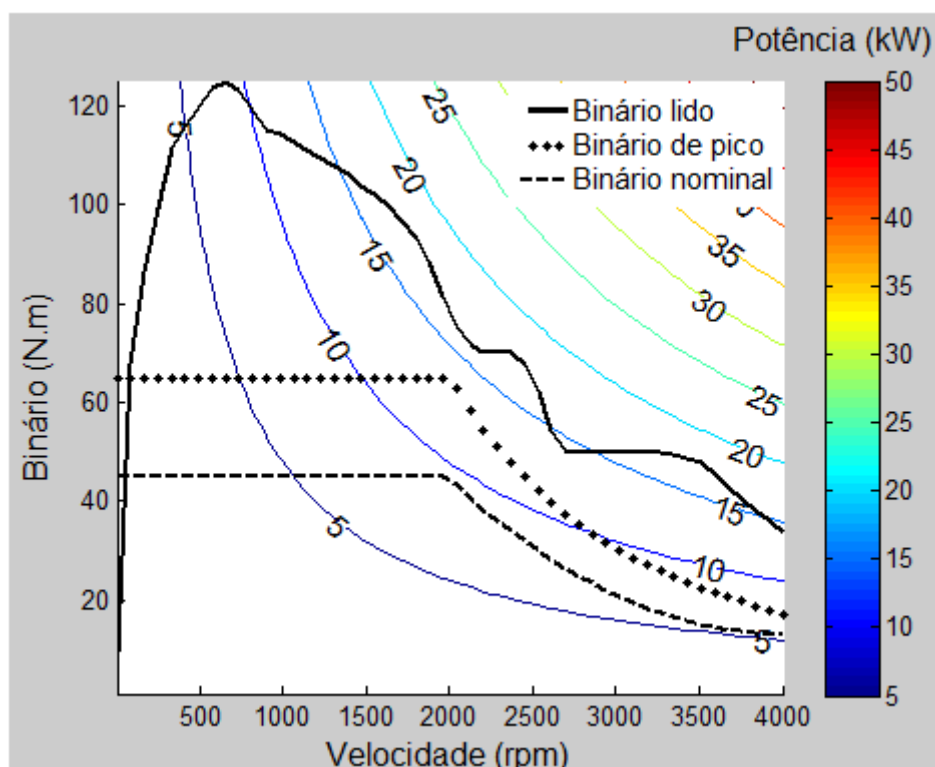
Foram feitos dois testes, um com os parâmetros de origem e outro com os reajustes dos parâmetros (Teste 1), em terreno plano, consistindo num arranque desde o repouso até atingir a velocidade máxima do veículo (previamente limitada a 50km/h). A recolha de dados foi feita com um computador portátil, ligado a uma ficha do controlador do motor, através de um programa próprio para o efeito, que permite a gravação de dados em intervalos de 0,5 segundos. Com os dados relativamente ao tempo e à velocidade instantânea, sabendo a massa do veículo, a relação de transmissão e o raio exterior da roda, pode ser calculado o binário do motor durante um percurso efectuado.

Os dados foram importados para o programa em MATLAB (Anexo C) através de uma tabela em Excel. O mapa da Figura 114 mostra os resultados do primeiro teste, realizado com os parâmetros de origem.



**Figura 114 – Mapa de rendimento relativo aos parâmetros de origem**

As bandas coloridas representam o rendimento, que no melhor dos casos pode chegar aos 85%. A linha a traço contínuo representa o binário “lido” durante o teste (em intervalos de 0,5s), as outras duas linhas representam os dados do fabricante do motor. Neste teste, os parâmetros limitativos de corrente, fornecida ao motor, estavam com o valor de 100%. Isto é, toda a corrente disponível poderia ser fornecida em todas as faixas de velocidade de rotação do motor. O que equivale a ter a zona de enfraquecimento a uma potência relativamente constante, como se pode observar no mapa de potência da Figura 115.



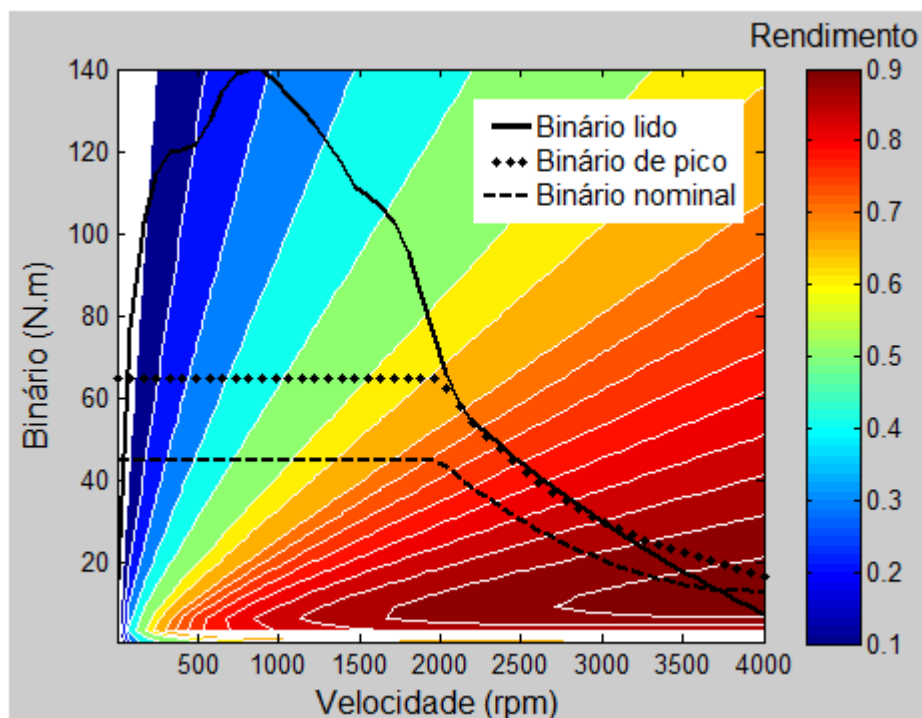
**Figura 115 – Mapa de potência relativo aos parâmetros de origem**

Da observação dos dois mapas anteriores, constata-se que o binário “lido” ultrapassa em muito o binário de pico especificado pelo fabricante do motor. No limite o motor do Little4 pode atingir o binário de pico durante um máximo de 5 minutos (dados do fabricante, presentes no Anexo B), após esse período de tempo o motor, que não consegue escoar todo o calor produzido, começará a sobreaquecer.

Na tentativa de resolver o problema de sobreaquecimento, foram inseridos parâmetros no controlador que limitaram o binário ao binário nominal, no entanto verificou-se que com esta configuração o carro tinha muitas dificuldades em arrancar, mesmo em sítios planos, e a sua aceleração era tão baixa que, para além de causar embaraço à circulação do tráfego, tornava a sua condução perigosa.

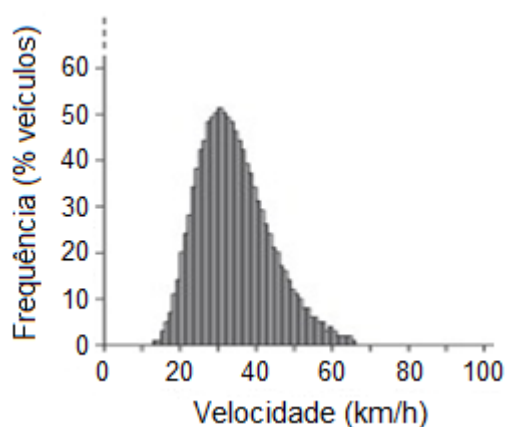
Fizeram-se várias afinações no valor dos parâmetros, percorrendo-se cerca de 350km, até que se conseguiu um arranque satisfatório e um aquecimento do motor controlado, embora o carro abraque bastante em percursos inclinados. Os percursos foram feitos na cidade de Guimarães e imediações, com várias subidas à montanha da Penha através de uma estrada de pendente elevada. Destas afinações surgiram os parâmetros para o Teste 1, cujo resultado se apresenta na Figura 116.





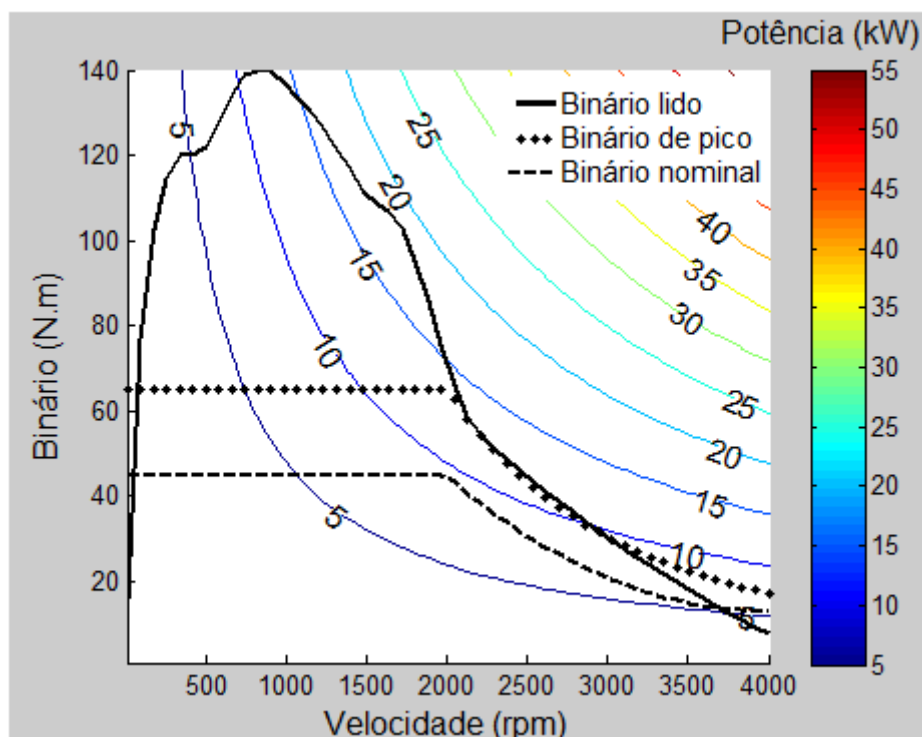
**Figura 116 – Mapa de rendimento relativo aos parâmetros do Teste 1**

Na zona do mapa que vai até cerca das 2000 rpm, o binário “lido” é bastante superior ao binário de pico do motor, mas é necessário para que o carro possa subir uma rampa com quatro pessoas adultas, de forma aceitável. Observa-se no mapa, que é uma zona de baixo rendimento, no entanto esta zona de funcionamento correspondente a velocidades pouco frequentes (2000rpm $\approx$ 22km/h, no Little) como mostra a Figura 117.



**Figura 117 – Distribuição da velocidade num circuito urbano típico [171]**

As potências envolvidas neste teste podem ser observadas na Figura 118. Na zona de enfraquecimento, acima de 2000 rpm, o binário obtido acompanha regularmente a curva do binário de pico, sendo que perto da velocidade máxima, torna-se mais baixo do que o binário nominal. Este facto faz com que a temperatura do motor se mantenha estável, pois em plano é frequente o carro viajar na sua velocidade máxima, com um binário abaixo do nominal o que permite dissipar mais calor do que o que é produzido.

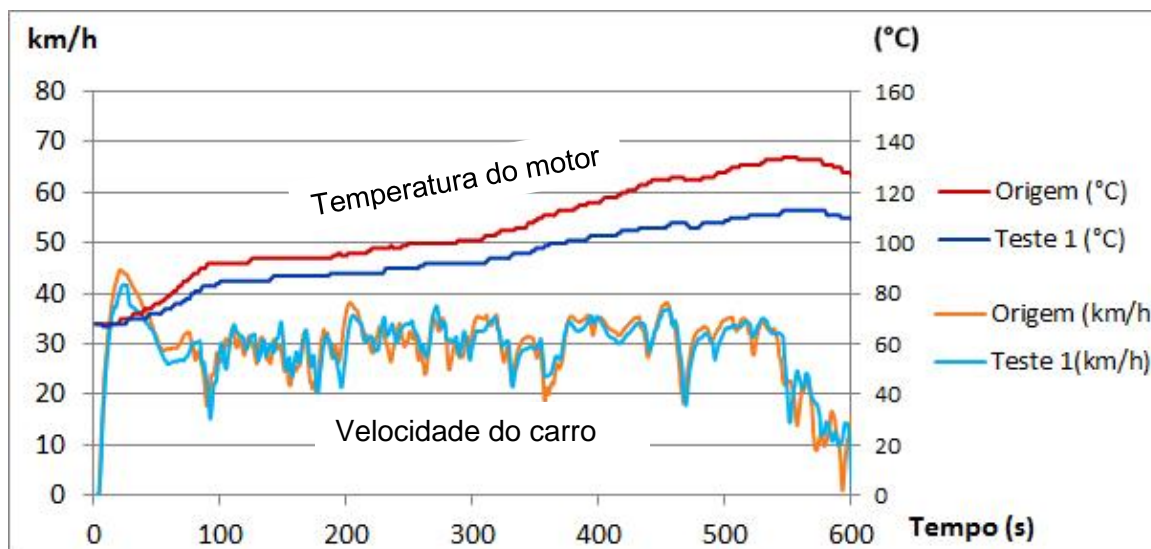


**Figura 118 – Mapa de potência relativo aos parâmetros do Teste 1**

Em subidas relativamente inclinadas o carro abandona para cerca de 30km/h (tal como se mostrou no gráfico teórico da Figura 71), rodando o motor a cerca de 2800 rpm. A esta rotação o binário lido coincide com o binário de pico (Figura 118). Como o fabricante recomenda um máximo de cinco minutos para este regime, se a distância for longa, o motor irá sobreaquecer progressivamente até atingir um determinado limite (secção 4.2.2), entrando em modo de falha (e em caso de insistência imobilizando o carro).

Para averiguar o comportamento da temperatura do motor do Little4, foi percorrido um trajeto que consistiu em duas subidas à montanha da Penha. Na primeira subida foram usados os parâmetros

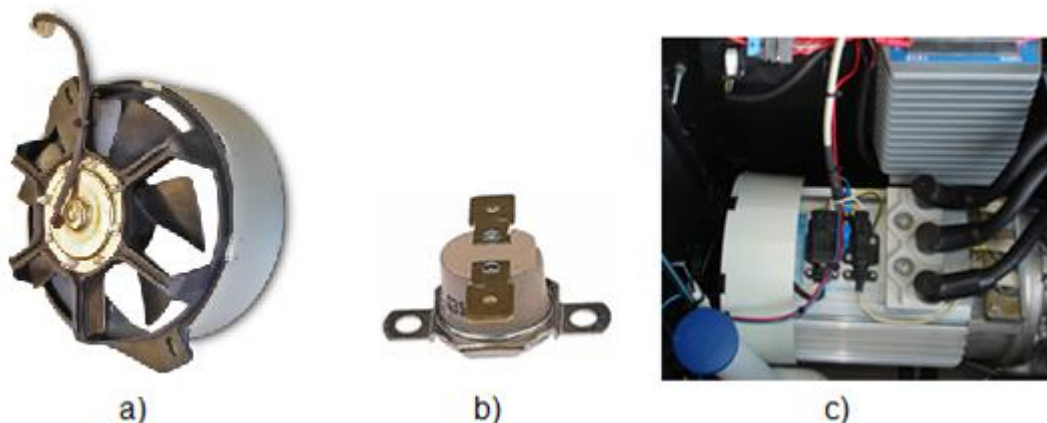
anteriores à optimização (de origem) e na segunda subida foram usados os parâmetros optimizados (Teste 1). Ambos os testes foram realizados partindo com a mesma temperatura do motor e com temperatura ambiente semelhante. Na Figura 119 mostra-se o registo das temperaturas do motor e das velocidades obtidas nos dois testes.



**Figura 119 – Temperatura do motor e velocidade do Little4, em relação à parametrização usada**

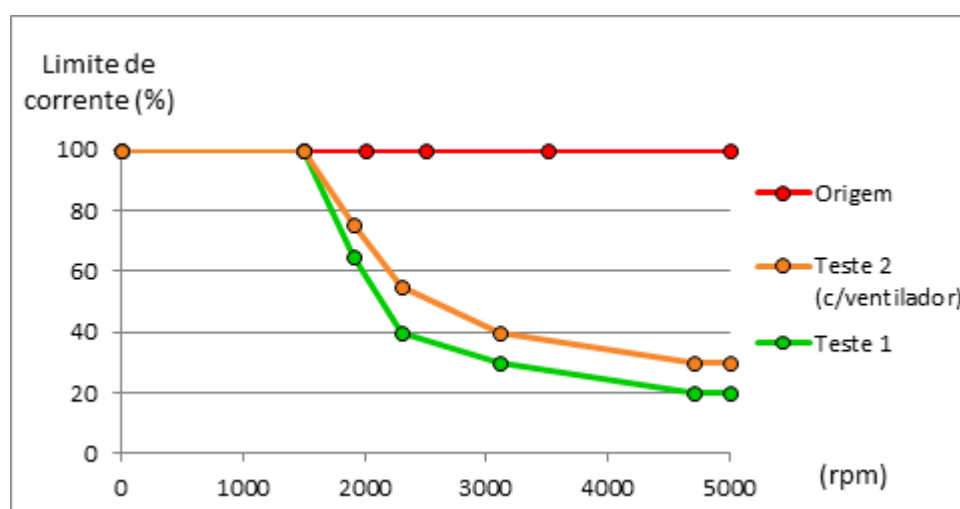
No Teste 1 nota-se uma ligeira diminuição da velocidade em alguns pontos do percurso, que é uma consequência de uma parametrização mais restritiva da potência do motor em relação aos parâmetros de origem. No entanto, nas temperaturas mais elevadas registadas no percurso, conseguiu-se uma redução de cerca de 21°C relativamente à temperatura registada com a parametrização de origem.

Para atenuar o problema do aquecimento em terreno com inclinações acentuadas e longas, bem como mitigar o abrandamento excessivo nas mesmas (que torna o carro desinteressante) foi colocado um ventilador axial elétrico no topo do motor (Figura 120a), que é acionado por um termóstato (Figura 120b). O termóstato, que foi colocado à superfície do motor com “pasta térmica” (para diminuir a resistência térmica de contacto), fecha se a temperatura for maior ou igual a 65°. A Figura 120c mostra o motor do Little4 depois de implementada a solução.



**Figura 120 – a) ventilador, b) termóstato, c) motor do Little4 após instalação do ventilador**

Com o ventilador colocado, foram afinados novamente os parâmetros de forma a tornar o carro menos lento em terrenos inclinados, mantendo a temperatura do motor numa gama de valores aceitável. Os limites percentuais de corrente, relativamente às zonas de funcionamento dos novos parâmetros (com o ventilador) podem ser comparados na Figura 121, com os já referidos (Origem e Teste 1).

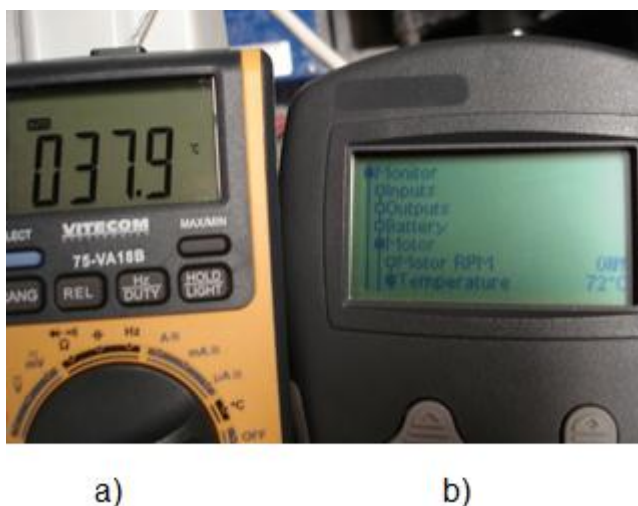


**Figura 121 – Limites de corrente em diferentes zonas de funcionamento, para os novos parâmetros adaptados para o motor com ventilador**

Não foram realizados testes (com gravação de dados) após colocação do ventilador, no entanto foram realizados percursos com inclinações acentuadas e distâncias longas sem que o carro entrasse no modo de falha. Para tal também contribuiu a alteração de um outro parâmetro, o da temperatura “de alerta”, (descrito na secção 4.2.2) de 125°C para 130°C mantendo a temperatura de corte nos

145°C. A temperatura corresponde à temperatura nos enrolamentos de cobre do motor, onde se encontra o sensor. Esta alteração poderá diminuir ligeiramente o tempo de vida útil dos enrolamentos do motor, no entanto espera-se que a situação descrita raramente ocorra, e caso ocorra, seja durante um período de tempo curto.

Mediu-se as temperaturas do interior do motor (nos enrolamentos) e a temperatura à superfície do motor (na carcaça) através dos aparelhos mostrados na Figura 122. A temperatura interior foi lida através do *output* do controlador na consola de parametrização. Para medir a temperatura exterior, recorreu-se a um multímetro (com função de temperatura) sendo colocada a extremidade de um termopar num pequeno furo existente na carcaça do motor (praticamente à superfície deste).



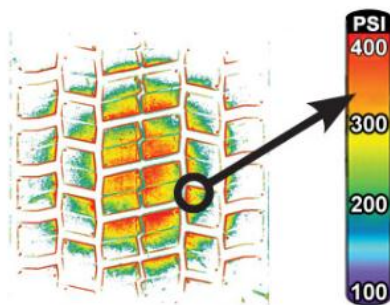
**Figura 122 – Aparelhos usados na medição das temperaturas interior e exterior do motor:**  
**a) multímetro; b) consola de parametrização do controlador (Curtis)**

Foi percorrido um trajeto longo em terreno inclinado e, quando o interior do motor (nos enrolamentos) atingiu cerca de 120 °C a sua superfície encontrava-se a cerca de 60°C. A temperatura ambiente, nesse dia era de cerca de 30°C. Como o gradiente térmico entre os enrolamentos de cobre e a superfície da carcaça foi de 60°C e o gradiente térmico entre a superfície da carcaça e o ambiente foi de apenas 30°C, deduz-se que o principal entrave ao escoamento de calor está na inércia térmica do material de construção do estator.

#### 4.4 Sugestões para melhorar o Little4

A suspensão que se encontra no Little4 é demasiado rígida. Levantando o carro do chão, num elevador, ao voltar a colocá-lo no chão as molas não cedem. Nem mesmo se o carregar com duas pessoas. Esta observação empírica carece de um estudo para aferir a constante de mola e a pré-carga adequados ao tipo de veículo. Deve ser estudado também o amortecimento de forma a obter a viscosidade adequada do óleo.

A pressão dos pneus parece ser demasiado baixa (1,5 bar), possivelmente para compensar a rigidez das molas, no entanto isto aumenta o atrito de rolamento, penalizando assim o consumo. Se a pressão dos pneus fosse aumentada para 2,5 bar, reduzir-se-ia o consumo em cerca de 10%. Uma das técnicas que se sugere, para que o fabricante do Little4 possa afinar a pressão dos pneus, baseia-se na pegada do pneu (*Tire tread footprint*), e usa uma película que muda de cor conforme a pressão a que for sujeita (Figura 123).



**Figura 123 – Imagem obtida através da técnica *Tire tread footprint* [172]**

Faz-se passar uma roda do carro sobre a referida película e afina-se a pressão, repetindo o processo até que a zona de contacto fique com uma cor uniforme. Existem outras técnicas para aferição da pressão dos pneus, como por exemplo através da temperatura em vários pontos do pneu, mas é um método que requer instrumentação, é bastante caro e moroso.

Os painéis da carroçaria têm rebites como principal elemento de união, contudo se sujeitos a vibração, emitem ruídos, para além das juntas não serem estanques. Sugere-se que antes da rebitagem, seja colocado um cordão à base de poliuretano (vulgarmente chamado de “cola e veda”) com vista a eliminar estes inconvenientes.

Propõe-se a substituição das lâmpadas de filamento por LED, de forma a minimizar o consumo de energia. Esta substituição seria gradual, conforme o preço das lâmpadas de LED for descendo no mercado.

O travão de pé fornece indicação ao controlador para este ativar a travagem regenerativa, mas essa informação é “on-off”, provém do interruptor que liga os faróis de stop. Durante a condução, a maior parte das vezes apenas se pretende abrandar a velocidade, e não travar violentamente. Uma solução passaria por colocar um sensor que detetasse a progressividade do pedal de travão à semelhança do acelerador. Existem sensores de posição (baseados em potenciómetros) que fazem esse efeito, no entanto a posição do pedal pode ser influenciada por folgas, pelo tipo de calços e mesmo pela temperatura. Assim, mais do que a posição do pedal do travão, seria aconselhável que o sensor acusasse a carga exercida pelo pé do condutor. Um sensor piezorresistivo poderá ser o indicado. Este seria colocado entre o pedal e o êmbolo do travão mecânico e ligado ao controlador (que já possui as entradas para este fim). A colocação de um sensor, deverá ter em conta que, mesmo que este avarie, jamais poderá por em causa o funcionamento normal da travagem mecânica.

Recomenda-se que as ligações elétricas da bateria, do controlador e do motor sejam apertadas com uma chave dinamométrica (de acordo com o binário de aperto referido no *datasheet* de cada componente) de forma a eliminar maus contactos que possam arruinar a ligação. Na Figura 124 mostra-se dois desses casos.



**Figura 124 – Ligações defeituosas: a) Bateria com borne queimado e solto; b) motor com a ligação do centro queimada**

O carregador de bateria deveria ser colocado numa posição mais elevada para evitar ser atingido por água que salta das rodas quando conduzido sob chuva.

Para minimizar os efeitos da temperatura no motor, podem ser colocadas grelhas de ventilação na frente do carro, para levar ar fresco ao motor, bem como outras grelhas na parte superior do compartimento do motor (junto ao para-brisas) para evacuação de ar quente.

## 4.5 Conclusões do capítulo

Constatou-se que o *Buggy* apresenta anomalias, como o desvio do alinhamento da direção com a variação da carga na suspensão, e um grave desalinhamento da roda traseira esquerda. O desenho da estrutura não permite a colocação das baterias sob os assentos (esta posição favoreceria o centro de gravidade e libertaria espaço para o porta-bagagens). O estilo da carcaça do *Buggy* não se assemelha à carcaça pretendida para um carro elétrico citadino. Como o *Buggy* é fornecido completo, à exceção do motor, logo muitas das peças da carroçaria seriam desaproveitadas. Por estes motivos, conclui-se que o *Buggy* não é o veículo mais apropriado para converter em veículo elétrico citadino.

A programação de um carro elétrico, através do controlador Curtis (usado no Little4) é relativamente fácil, mas requer alguma cautela. Alguns parâmetros têm efeitos práticos adversos, e podem interferir com outros que já estariam otimizados. Assim o acerto de um parâmetro requer a experimentação do veículo, nova leitura de dados, e porventura o acerto de outros parâmetros que entretanto se revelarem desadequados.

Relativamente aos parâmetros do controlador do motor do Little4, verificou-se que se estes fossem otimizados para que o motor funcionasse sem aquecimento exagerado, o motor do Little4 ficaria com pouca potência. Portanto, conclui-se que o motor existente (de 4kW) não tem potência suficiente para superar terrenos desnivelados, como é o caso da região do Minho, a uma velocidade aceitável. Este facto pode ser atenuado através da instalação de um ventilador e de um ajuste na parametrização do controlador. Deste modo, possibilita-se regimes de funcionamento do motor acima dos nominais, ainda que à custa de um pior rendimento e do aumento da temperatura do motor. Constatou-se que o principal entrave ao escoamento de calor está mais relacionado com inércia térmica do material de construção do estator do que com a capacidade do ventilador instalado.



## 5 CONCLUSÕES

A abordagem realizada ao estado da arte, permitiu de um modo geral, constatar que os carros elétricos atuais apresentam performances relativamente próximas e até superiores aos carros com motor a combustão interna, mas apresentam como principais desvantagens, uma autonomia relativamente reduzida e um elevado custo. No entanto assiste-se a uma grande movimentação dos fabricantes de automóveis (que se nota pelo investimento, investigação e exibição de protótipos) e a grandes debates políticos, ambientais e tecnológicos, o que indica que neste momento pode estar a eclodir uma grande revolução na mobilidade elétrica.

Os motores em geral apresentam tecnologias bastante fiáveis e “maduras”, não sendo atualmente um obstáculo à proliferação dos veículos elétricos. Destaca-se o motor de relutância comutada (SRM) que ultimamente tem sido bastante desenvolvido, apresenta uma construção robusta e barata, pode suportar velocidades de rotação e temperaturas superiores aos motores de ímanes permanentes, e possui rendimentos idênticos a estes.

Constata-se que as baterias atuais não correspondem às exigências do sector da mobilidade elétrica, quer em autonomia quer em custo. As baterias de lítio parecem ser as que oferecem uma maior densidade energética, sendo que destas, as mais seguras são as que incorporam fosfato de ferro ( $\text{LiFePO}_4$ ). No entanto, precisam de ser produzidas em grande escala e em *pack's* projetados para veículos elétricos, para que possam ter um preço mais baixo. É também necessário que se desenvolvam outras tecnologias de baterias, como as de lítio-ar e alumínio-ar e zinco-ar, que poderão possuir densidades energéticas elevadas, que possibilitem o aumento da autonomia dos veículos elétricos.

Os controladores para veículos elétricos atuais são relativamente caros e carecem de desenvolvimento de forma a possuírem melhores rendimentos. Os controladores projetados para um motor específico (geralmente vendidos juntamente com o motor) são em geral mais baratos e mais fáceis de programar, contudo poderão não se ajustar a outros tipos de motores.

Quanto ao trabalho teórico, constatou-se ser possível prever um mapa de rendimento de um motor elétrico, de forma simplificada e com recurso a poucos dados. Conclui-se que esse mapa de rendimento é uma ferramenta fundamental na programação de um veículo elétrico, e que a sua exatidão é suficientemente robusta para o efeito pretendido.

Constatou-se que no modelo de condução urbano (NEDC), a simulação estima um consumo para o Little4 de 11,2 kWh/100km. Verificou-se que uma diminuição da massa do carro, um aumento da pressão dos pneus, um menor coeficiente de arrasto ou uma diminuição da área frontal, alteram o consumo do carro. Concluindo-se que para o modelo de condução urbana, a massa do veículo e a pressão dos pneus são os fatores mais importantes na redução de consumo. O coeficiente de arrasto e a área frontal tem um impacto menor no consumo, em ciclo urbano, por este estipular velocidades relativamente baixas.

Quanto ao *Buggy*, constatou-se que apresenta anomalias como o desvio do alinhamento da direção, com a variação da carga na suspensão, e um grave desalinhamento da roda traseira esquerda. O desenho da estrutura não permite a colocação das baterias sob os assentos (esta posição favoreceria o centro de gravidade e libertaria espaço para o porta-bagagens), pois se os assentos fossem reposicionados mais acima, para que as baterias coubessem, então os passageiros teriam falta de espaço entre as suas cabeças e o tejadilho. O estilo da carcaça do *Buggy* não se assemelha à carcaça pretendida para um carro elétrico citadino, pelo que além da conversão da motorização, o carro também deveria ser remodelado. Como o *Buggy* é fornecido completo, à exceção do motor, logo muitas das peças da carroçaria seriam desaproveitadas. As jantes e os pneus (tipo todo-o-terreno) teriam de ser substituídos por outros mais estreitos para favorecer o consumo e autonomia. Por estes motivos, conclui-se que o *Buggy* não é o veículo mais apropriado para converter em veículo elétrico citadino.

A programação de um carro elétrico, através do controlador Curtis (usado no Little4) é relativamente fácil, mas requer alguma cautela. Alguns parâmetros têm efeitos práticos adversos, e podem interferir com outros que já estariam otimizados. Assim o acerto de um parâmetro requer a experimentação do veículo, nova leitura de dados, e porventura o acerto de outros parâmetros que entretanto se revelarem desadequados.

Relativamente aos parâmetros do controlador do motor do Little4, verificou-se que se estes fossem otimizados para que o motor funcionasse sem aquecimento exagerado, o motor do Little4 ficaria com pouca potência. Ou seja, qualquer pequena inclinação faz afrouxar a velocidade do carro, causando embaraço ao tráfego, o que torna o carro desinteressante. Portanto, conclui-se que o motor existente (de 4kW) não tem potência suficiente para superar terrenos desnivelados, como é o caso da região do Minho, a uma velocidade aceitável. Este facto pode ser atenuado através da instalação de um

ventilador e de um ajuste na parametrização do controlador. Deste modo, possibilita-se regimes de funcionamento do motor acima dos nominais, ainda que à custa de um pior rendimento e do aumento da temperatura do motor. Constatou-se que o gradiente térmico entre o interior do motor (nos enrolamentos) e a sua superfície atingiu cerca de 60 °C, e simultaneamente o gradiente térmico entre a superfície do motor e o ar ambiente atingiu cerca de 30°C. Este facto permite concluir que o principal entrave ao escoamento de calor está na inércia térmica do material de construção do estator.

Por fim, conclui-se que depois de optimizados os parâmetros do Little4, este poderá ser uma boa opção para circular em terrenos relativamente pouco inclinados ou planos e em climas amenos.

## **5.6 Trabalhos futuros**

Após a conclusão deste trabalho, sugere-se para trabalho futuro, um estudo que permita a redução de massa em veículos eléctricos, de forma a aumentar a sua performance (mesmo com motores de baixa potência) e diminuir o consumo, aumentando a sua autonomia.

Uma outra sugestão, passaria pela colocação de uma transmissão variável (por exemplo um CVT) num veículo eléctrico e fazer um estudo comparativo dos rendimentos, antes e depois da instalação da transmissão variável.

Por último, sugere-se para o Little4, a aplicação do novo motor de relutância e o uso de baterias de LiFePO<sub>4</sub>, seguida de um estudo do rendimento, com os aparelhos que se mostrarem necessários, de forma a obter um rendimento global fidedigno.



## REFERÊNCIAS

1. *oecd.org*. [Online] <http://www.oecd.org/dataoecd/13/10/49030181.pdf>.
2. *gregor.us*. [Online] <http://gregor.us/coal/coal-wins-again-global-energy-use-by-source-from-the-2012-bp-statistical-review/>.
3. *inb.gov.br*. [Online] [http://www.inb.gov.br/pt-br/webforms/Interna2.aspx?secao\\_id=76](http://www.inb.gov.br/pt-br/webforms/Interna2.aspx?secao_id=76).
4. *sbpe.org.br*. [Online] [www.sbpe.org.br/socios/download.php?id=196](http://www.sbpe.org.br/socios/download.php?id=196).
5. **Seth Leitman, Leitman e Brant, Bob**. *Build Your Own Electric Vehicle*. s.l. : McGraw-Hill, 2009.
6. **Martins, Jorge e Brito , Francisco**. *Carros Elétricos*. s.l. : PUBLINDUSTRIA, 2012.
7. *hibridosclube.com*. [Online] <http://hibridosclube.com/hybforum/index.php?topic=36.0>.
8. **Nasser, Hashernnia e Asaei, Behzad** . Comparative Study of Using Different Electric Motors in the Electric Vehicles. *Proceedings of the 2008 International Conference on Electrical Machines*. 2008.
9. *ceramics.org*. [Online] <http://ceramics.org/ceramicstechnology/2011/10/05/arpa-e-awards-316-million-to-rare-earth-substitute-projects/>.
10. **Hindmarsh, John**. *Electric Machines and Drives Worked Examples*. UK : Pergamon Press, 1985.
11. *techon.nikkeibp.co.jp*. [Online]  
[http://techon.nikkeibp.co.jp/english/NEWS\\_EN/20091217/178651/#](http://techon.nikkeibp.co.jp/english/NEWS_EN/20091217/178651/#).
12. *thetechjournal.com*. [Online] <http://thetechjournal.com/tag/volvo-and-siemens-make-partnership-for-better-electric-engines>.
13. *hitachi-hap.com*. [Online] <http://www.hitachi-hap.com/products/Motors/EMI/index.html>.
14. **Engelmann, Richard H: e Middendorf, William H**. *Handbook of Electric Motors*. USA : s.n., 1995.

15. **Honda, Flavio.** *MOTORES DE CORRENTE CONTÍNUA Guia rápido para uma especificação precisa.* s.l. : Siemens LTDA Unidade Automação e Controle – Acionamentos e Motores Elétrico, 2006.
16. *evaosd.fartoomuch.info.* [Online] <http://evaosd.fartoomuch.info/library/emotor.htm>.
17. *dsce.fee.unicamp.br.* [Online] <http://www.dsce.fee.unicamp.br/~antenor/pdf/elpot/historia.pdf>.
18. **Camargo, Ricardo.** *DESEMPENHO DE MOTORES DE INDUÇÃO TRIFÁSICOS.* Itajubá : UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ, 2010.
19. *reepedia.com.* [Online] <http://www.reepedia.com/archives/2221>.
20. *bloomberg.com.* [Online] <http://www.bloomberg.com/news/2011-01-14/toyota-readying-electric-motors-that-don-t-use-rare-earths.html>.
21. *Electric Motor Drive Selection Issues for HEV Propulsion Systems: A Comparative Study.* **Zeraoulia, M., Mohamed, E. H. B. e Diallo, D.** s.l. : IEEE TRANSACTIONS ON VEHICULAR TECHNOLOGY, VOL. 55, NO. 6,, 2006.
22. *danfoss.com.* [Online] <http://www.danfoss.com/BusinessAreas/DrivesSolutions/ECplus-Concept/ECplus-MotorTechnology.htm>.
23. **Larminie, James e Lowry, John.** *Electric Vehicle Technology Explained.* Inglaterra : Wiley, 2003.
24. *catalogo.weg.com.br.* [Online] <http://catalogo.weg.com.br/files/wegnet/WEG-motor-de-imas-permanentes-e-inversor-de-frequencia-artigo-tecnico-portugues-br.pdf>.
25. *sdt-safidrivetechnology.co.uk.* [Online] <http://www.sdt-safidrivetechnology.co.uk/brushless-motors/>.
26. *csemag.com.* [Online] <http://www.csemag.com/home/single-article/advanced-motor-design-new-motors-reach-new-applications/091900ae4799854a68b136baeeb4677b.html>.
27. *calsol.berkeley.edu.* [Online] <http://calsol.berkeley.edu/news/2012/if-we-had-cylinders-wed-be-banging-on-all-of-them/>.

28. *cleanmpg.com*. [Online] <http://www.cleanmpg.com/forums/showthread.php?p=8384>.
29. *evo-electric.com*. [Online] <http://www.evo-electric.com/products/electric-motors/>.
30. *apexdriveabs.com*. [Online] <http://www.apexdriveabs.com/brushless-electric-motor-images.html>.
31. *csemag.com*. [Online] <http://www.csemag.com/home/single-article/advanced-motor-design-new-motors-reach-new-applications/091900ae4799854a68b136baeeb4677b.html>.
32. *yasamotors.com*. [Online] <http://www.yasamotors.com/technology/products/yasa-750>.
33. *kldenergy.com*. [Online] <http://www.kldenergy.com/products.html>.
34. **Lobato, Pedro , Cruz, A. e Silva, J.** The Switched Reluctance Generator for Wind Power Conversion. LabSEI -Escola Superior de Tecnologia de Setúbal / Instituto Politécnico de Setúbal.
35. *users.utcluj.ro*. [Online] <http://users.utcluj.ro/~szabol/Papers/Oradea2004Stet.pdf>.
36. *ti.com*. [Online] <http://www.ti.com/lit/an/spra420a/spra420a.pdf>.
37. *techon.nikkeibp.co.jp*. [Online]  
[http://techon.nikkeibp.co.jp/english/NEWS\\_EN/20120123/203839/](http://techon.nikkeibp.co.jp/english/NEWS_EN/20120123/203839/).
38. *squidoo.com*. [Online] <http://www.squidoo.com/researching-motorized-bicycles>.
39. *epluselectricbike.com*. [Online] <http://epluselectricbike.com/buy-bikes-online/e-elite-retro-cruiser-1000-watt>.
40. *hondanews.com*. [Online] <http://www.hondanews.com/channels/honda-automobiles-fcx-clarity/photos/9293506c-4483-4e6f-b236-4ed047dc4a5f>.
41. *pamensky.com*. [Online] <http://www.pamensky.com/weg-water-jacket-cooled-motors/>.
42. *electronica.mk*. [Online]  
[http://electronica.mk/all\\_articles/Electric\\_Car\\_Projects/EV\\_Controller/EV\\_Motor\\_Controller\\_144V\\_600A.html](http://electronica.mk/all_articles/Electric_Car_Projects/EV_Controller/EV_Motor_Controller_144V_600A.html).

43. **Melo, Pedro.** *EVOLUÇÃO DOS PARÂMETROS DE MOTORES DE INDUÇÃO TRIFÁSICOS E SUA INFLUÊNCIA EM ESTRATÉGIAS DE CONTROLO.* s.l. : Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2004.
44. *hassockshog.co.uk.* [Online] [http://www.hassockshog.co.uk/motor\\_controller\\_description.htm](http://www.hassockshog.co.uk/motor_controller_description.htm).
45. *evolveitmotors.com.* [Online] <http://evolveitmotors.com/solutions/>.
46. *cafeelectric.com.* [Online] <http://cafeelectric.com>.
47. *evnetics.com.* [Online] <http://www.evnetics.com/index.php/products/jr>.
48. *cerdec.army.* [Online] <http://www.11ecpss.betterbtr.com/pdf%20folder%20monday/M6-Army%20Power%20Efforts%20July07.pdf>.
49. *bosch.com.br.* [Online] [http://www.bosch.com.br/br/autopecas/produtos/baterias/downloads/Manual\\_de\\_Baterias\\_Bosch\\_6\\_008\\_FP1728\\_04\\_2007.pdf](http://www.bosch.com.br/br/autopecas/produtos/baterias/downloads/Manual_de_Baterias_Bosch_6_008_FP1728_04_2007.pdf).
50. **Linden, David e Reddy, Thomas B.** *HANDBOOK OF BATTERIES* ,3<sup>a</sup> ed. s.l. : McGraw-Hill, 1995.
51. *paginas.fe.up.pt.* [Online] [http://paginas.fe.up.pt/~ee03096/index\\_ficheiros/Page666.htm](http://paginas.fe.up.pt/~ee03096/index_ficheiros/Page666.htm).
52. *homework.uoregon.edu.* [Online] <http://homework.uoregon.edu/pub/class/hc441/bstorage.html>.
53. *batteryuniversity.com.* *batteryuniversity.com.* [Online] <http://batteryuniversity.com/>.
54. *electrochem.org.* [Online] [http://www.electrochem.org/dl/interface/wtr/wtr08/wtr08\\_p40-45.pdf](http://www.electrochem.org/dl/interface/wtr/wtr08/wtr08_p40-45.pdf).
55. **Rantik, Michail.** *Life Cycle Assessment of Five Batteries for Electric Vehicles under Different Charging Regimes.* Stockholm : KFB - Kommunikatinsforsknings-beredningem, 1999.
56. *verlab.dcc.ufmg.br.* [Online] <http://www.verlab.dcc.ufmg.br/projetos/roomba/batteries>.
57. *konder.com.* [Online] <http://www.konder.com.br/especificacoes-tecnicas>.



58. *batterycouncil.org*. [Online]  
<http://www.batterycouncil.org/LeadAcidBatteries/BatteryRecycling/tabid/71/Default.aspx>.
59. *autosil.p*. [Online] [http://www.autosil.pt/abrir/tecnologias/bateria\\_chumbo\\_acido](http://www.autosil.pt/abrir/tecnologias/bateria_chumbo_acido).
60. *electricauto.com*. [Online] [http://www.electricauto.com/batt\\_prog.html](http://www.electricauto.com/batt_prog.html).
61. **Root, Michael**. *The TAB Battery Book*. s.l. : Mc Graw Hill, 2001.
62. *onlybatteries.com*. [Online] <http://www.onlybatteries.com/showitem.asp?itemid=11052>.
63. *systems-sunlight.com*. [Online] [http://www.systems-sunlight.com/?contentid=379&langflag=\\_en](http://www.systems-sunlight.com/?contentid=379&langflag=_en).
64. *ironedison.com*. [Online] <http://ironedison.com/>.
65. *nickel-iron-battery.com*. [Online] <http://www.nickel-iron-battery.com/>.
66. **M., Broussely e G. , Pistoia**. Industrial Applications of Batteries From Cars to Aerospace and Energy Storage. *Elsevier*. M. Broussely, 20.
67. *ehs.who.edu*. [Online] <http://ehs.who.edu/ehs/occsafety/LithiumBatterySafetyGuideSG10.pdf>.
68. *hardware.com*. [Online] <http://www.hardware.com.br/livros/hardware/ion.html>.
69. *greencarcongress.com*. [Online] <http://www.greencarcongress.com/2010/02/yang-20100226.html>.
70. *exa.com*. [Online] <http://www.exa.com.tw/exa/structure.htm>.
71. *ecolmeia.org.br*. [Online] <http://www.ecolmeia.org.br/pilhasebaterias/sobre.htm>.
72. *phostechlithium.com*. [Online] [http://www.phostechlithium.com/prf\\_historique\\_e.php](http://www.phostechlithium.com/prf_historique_e.php).
73. *pubs.rsc.org*. [Online] <http://pubs.rsc.org/en/content/articlepdf/2011/ee/c0ee00029a>.
74. *hipowergroup.com*. [Online] <http://www.hipowergroup.com/2010/1019/1.html>.
75. *gm-volt.com*. [Online] <http://gm-volt.com/2009/01/04/eestor-gets-a-trademark-patent-on-eesu-and-provides-specs-for-a-24v-eesu/>.

76. *toshiba.com*. [Online] [http://www.toshiba.com/ind/product\\_display.jsp?id1=821](http://www.toshiba.com/ind/product_display.jsp?id1=821).
77. *electric-vehiclenews.com*. [Online] <http://www.electric-vehiclenews.com/2009/07/revolt-and-basf-to-develop-rechargeable.html>.
78. *edn.com*. [Online] [http://www.edn.com/article/511522-Selecting\\_the\\_best\\_battery\\_for\\_embedded\\_system\\_applications.php](http://www.edn.com/article/511522-Selecting_the_best_battery_for_embedded_system_applications.php).
79. *revolttechnology.com*. [Online] [www.revolttechnology.com](http://www.revolttechnology.com).
80. *springerlink.com*. [Online] <http://www.springerlink.com/content/r2m553620436l341/fulltext.pdf>.
81. *brighthub.com*. [Online] <http://www.brighthub.com/environment/renewable-energy/articles/117074.aspx>.
82. *sciencedirect.com*. [Online] <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378775302003701>.
83. *ibm.com*. [Online] [http://www.ibm.com/smarterplanet/us/en/smart\\_grid/article/battery500.html](http://www.ibm.com/smarterplanet/us/en/smart_grid/article/battery500.html).
84. *flickr.com*. [Online] <http://www.flickr.com/photos/energylabdcu/3920034268/>.
85. **Modiba, Portia**. *ELECTROLYTES FOR REDOX FLOW BATTERY*. Republic of South Africa : University of Stellenbosch, 2009.
86. *web.ing.puc.cl*. [Online] <http://web.ing.puc.cl/~power/paperspdf/dixon/42a.pdf>.
87. *garmanage.com*. [Online] [http://www.garmanage.com/atelier/index.cgi?path=public&B&Energy\\_storage/Supercapacitors](http://www.garmanage.com/atelier/index.cgi?path=public&B&Energy_storage/Supercapacitors).
88. *lqes.iqm.unicamp.br*. [Online] [http://lqes.iqm.unicamp.br/canal\\_cientifico/lqes\\_news/lqes\\_news\\_cit/lqes\\_news\\_2006/lqes\\_news\\_novidades\\_747.html](http://lqes.iqm.unicamp.br/canal_cientifico/lqes_news/lqes_news_cit/lqes_news_2006/lqes_news_novidades_747.html).
89. *britannica.com*. [Online] <http://www.britannica.com/EBchecked/topic/247199/Sir-William-Robert-Grove>.

90. **Marques, Ana, Augusto, André e Monteiro, Filipe.** *Seminários de Desenvolvimento Sustentável - O hidrogénio como vector energético nos transportes.* Lisboa : IST, 2004.
91. *THE POLYMER ELECTROLYTE MEMBRANE FUEL CELL AS ELECTRIC ENERGY SOURCE, STEADY STATE AND DYNAMIC BEHAVIOR.* **Costa, R. A., Camacho, J. R. e Guimarães Jr., S. C.** Brazil : s.n.
92. *1.eere.energy.gov.* [Online]  
[http://www1.eere.energy.gov/hydrogenandfuelcells/fc\\_animation\\_components.html](http://www1.eere.energy.gov/hydrogenandfuelcells/fc_animation_components.html).
93. *1.eere.energy.gov.* [Online]  
[http://www1.eere.energy.gov/hydrogenandfuelcells/fuelcells/pdfs/fc\\_comparison\\_chart.pdf](http://www1.eere.energy.gov/hydrogenandfuelcells/fuelcells/pdfs/fc_comparison_chart.pdf).
94. *horizonfuelcell.com.* [Online] [http://www.horizonfuelcell.com/portable\\_power\\_minipak.htm](http://www.horizonfuelcell.com/portable_power_minipak.htm).
95. *zbt-duisburg.d.* [Online] <http://www.zbt-duisburg.de/en/portfolio/fuel-cell-stacks/automotive-stacks/>.
96. *auto.howstuffworks.co.* [Online] <http://auto.howstuffworks.com/cvt3.htm>.
97. *theengineer.co.uk.* [Online] <http://www.theengineer.co.uk/sectors/automotive/in-depth/flying-start-flybrid-develops-flywheel-hybrids/1007395.article>.
98. *flybridsystems.com.* [Online] <http://www.flybridsystems.com/F1System.html>.
99. *xtrac.com.* [Online] <http://www.xtrac.com/>.
100. *racecar-engineering.* [Online] <http://www.racecar-engineering.com/articles/f1/flywheel-hybrid-systems-kers/>.
101. *racecar-engineering.com.* [Online] <http://www.racecar-engineering.com/articles/f1/flywheel-hybrid-systems-kers/>.
102. *knol.google.com.* [Online] <http://knol.google.com/k/saving-energy-in-current-transport-systems>.
103. *testdevices.com.* [Online] [http://www.testdevices.com/white\\_papers\\_pdf/flywheel\\_art\\_TD1w.pdf](http://www.testdevices.com/white_papers_pdf/flywheel_art_TD1w.pdf).
104. *lincah.com.* [Online] <http://www.lincah.com/volvo-car-corporation-tests-flywheel-technology>.

105. *boschrexroth.com*. [Online]  
[http://www.boschrexroth.com/business\\_units/brm/en/products\\_and\\_solutions/hydraulic-systems/hrb-system/paralleles-hrb/index.jsp](http://www.boschrexroth.com/business_units/brm/en/products_and_solutions/hydraulic-systems/hrb-system/paralleles-hrb/index.jsp).
106. *carros.hsw.uol.com.br*. [Online] <http://carros.hsw.uol.com.br/frenagem-regenerativa4.htm>.
107. *mdi.lu*. [Online] <http://www.mdi.lu/moteurs.php>.
108. *tatamotors.com*. [Online] <http://www.tatamotors.com/media/press-releases.php?id=750>.
109. *phous.com*. [Online] <http://www.phous.com/articles/scuderi-air-hybrid-engine-could-offer-big-mpg-gains.php>.
110. *gizmag.com*. [Online] <http://www.gizmag.com/new-multi-speed-electric-vehicle-transmission-improves-ev-performance-and-range/11670/>.
111. *plm.automation.siemens.com*. [Online]  
[http://www.plm.automation.siemens.com/en\\_sg/about\\_us/success/case\\_study.cfm?Component=74570&ComponentTemplate=1481](http://www.plm.automation.siemens.com/en_sg/about_us/success/case_study.cfm?Component=74570&ComponentTemplate=1481).
112. *jsae.or.jp*. [Online] [http://www.jsae.or.jp/autotech/data\\_e/8-10e.html](http://www.jsae.or.jp/autotech/data_e/8-10e.html).
113. *luk.de*. [Online] <http://www.luk.de/content.luk.de/en/press/press-releases/press-details.jsp?id=3350721>.
114. *zeroshift*. [Online] <http://www.zeroshift.com/>.
115. *xtrac.com*. [Online] <http://www.xtrac.com/Product%20Specifications.htm>.
116. *zeroshift.com*. [Online] <http://www.zeroshift.com/> .
117. *womackmachine.com*. [Online]  
<http://www.womackmachine.com/pdf/rb365/47th/Section10/Sec10pg504PumpMotorTransmissionEfficiencies.pdf>.

118. *behrgroup.com*. [Online]  
[http://www.behrgroup.com/internet/behrrmm.nsf/lupgraphics/Behr\\_Thermomanagement\\_TPT09\\_E.pdf/\\$file/Behr\\_Thermomanagement\\_TPT09\\_E.pdf](http://www.behrgroup.com/internet/behrrmm.nsf/lupgraphics/Behr_Thermomanagement_TPT09_E.pdf/$file/Behr_Thermomanagement_TPT09_E.pdf).
119. *go-prius.com*. [Online] <http://go-prius.com/info/toyota-prius-and-honda-civic-hybrid-battery-cost>.
120. *world.honda.com*. [Online] <http://world.honda.com/EV-neo/battery/index.html>.
121. *zemotoring.com*. [Online] <http://www.zemotoring.com/news/2011/08/sae-and-ieee-call-for-new-j1772-charging-standard>.
122. *internationalconfig.com*. [Online] <http://www.internationalconfig.com/>.
123. *rema-ev.com*. [Online] <http://www.rema-ev.com/>.
124. *sae.org*. [Online] <http://www.sae.org/pdevent/webinarsbytechinterest/>.
125. *conncn.com*. [Online] [http://www.conncn.com/Product/Pro\\_show.asp?Pro\\_id=83432](http://www.conncn.com/Product/Pro_show.asp?Pro_id=83432).
126. *charge.yazaki-group.com*. [Online] [http://charge.yazaki-group.com/english/product/quick\\_outlet\\_jp.html](http://charge.yazaki-group.com/english/product/quick_outlet_jp.html).
127. *mpoweruk.com*. [Online] <http://www.mpoweruk.com/infrastructure.htm>.
128. *greencarcongress.com*. [Online] <http://www.greencarcongress.com/2011/10/iec-20111020.html>.
129. *mobie.pt*. [Online] <http://www.mobie.pt/newsdetail?newsid=58478>.
130. *e-move.tv*. [Online] <http://e-move.tv/lancamentos/grupo-petrotec-cria-novo-posto-rapido>.
131. **Chabot, Pedro Arsuaga**. *Vehículos eléctricos y redes para su recarga*. s.l. : Ra-Ma, 2010.
132. *blackheathbugle.wordpress.com*. [Online] [blackheathbugle.wordpress.com/](http://blackheathbugle.wordpress.com/) - Reino Unido.
133. *inhabitat.com*. [Online] <http://inhabitat.com/index.php?s=ev+charging+stations>.
134. *hybridabc.com*. [Online] <http://hybridabc.com/oregon-dot-selects-aerovironment-for-electric-vehicle-chargers/>.

135. *metronews.com.p.* [Online] <http://www.metronews.com.pt/2010/09/17/evora-inaugura-posto-de-carregamento/>.
136. *epyonpower.com.* [Online]  
[http://www.epyonpower.com/ChargingInfrastructure/charginginfrastructure/charging\\_infrastructu](http://www.epyonpower.com/ChargingInfrastructure/charginginfrastructure/charging_infrastructu)  
[re.aspx](http://www.epyonpower.com/ChargingInfrastructure/charginginfrastructure/charging_infrastructu).
137. *japanfs.org.* [Online] <http://www.japanfs.org/en/pages/028974.html>.
138. *repositorium.sdum.uminho.pt.* [Online]  
<http://repositorium.sdum.uminho.pt/bitstream/1822/15698/1/Smart%20Electric%20Vehicle%20Charging%20System.pdf>.
139. *dspace.ist.utl.pt/bitstream.* [Online]  
<https://dspace.ist.utl.pt/bitstream/2295/1021422/1/Dissertacao%20Miguel%20Silva%20n.52224%20-%20SmartGrids%20Portugal%20v3.0.pdf>.
140. *play.google.com/stor.* [Online]  
[https://play.google.com/store/apps/details?id=novabase.mobie.activities&feature=search\\_result](https://play.google.com/store/apps/details?id=novabase.mobie.activities&feature=search_result).
141. *chargelocator.com.* [Online] <http://chargelocator.com/>.
142. *delphi.com.* [Online] <http://delphi.com/manufacturers/auto/hevevproducts/charging-cordsets/wrls-chrg/>.
143. *greencarcongress.com.* [Online] <http://www.greencarcongress.com/2011/10/iec-20111020.html>.
144. *orgalime.org.* [Online] [http://www.orgalime.org/pdf/pp\\_electric\\_vehicles\\_feb10.pdf](http://www.orgalime.org/pdf/pp_electric_vehicles_feb10.pdf).
145. **Mathoy, Arno** . *Definition and implementation of a global EV charging infrastructure.* s.l. : BRUSA Elektronik, 2008.
146. *afdc.energy.gov.* [Online]  
[http://www.afdc.energy.gov/afdc/fuels/electricity\\_infrastructure.html#level2](http://www.afdc.energy.gov/afdc/fuels/electricity_infrastructure.html#level2).

147. *pluginrecharge.com*. [Online] <http://www.pluginrecharge.com/2009/08/charging-station-levels.html>.
148. *utc.edu*. [Online] <http://www.utc.edu/Research/CETE/electric.php>.
149. *sciencedirect.com*. [Online]  
<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378775301008205>.
150. *bdbatteries.com*. [Online] <http://www.bdbatteries.com/peukert.php>.
151. *geopubs.wr.usgs.gov*. [Online] <http://geopubs.wr.usgs.gov/open-file/of00-128/>.
152. **Dhameja, Sandeep**. *ELECTRIC VEHICLE BATTERY SYSTEMS*. s.l. : Newnes, 2002.
153. **Jazar, Reza N**. *Vehicle Dynamics: Theory and Application*. New York : Springer, 2008.
154. **Brito, Jorge Miguel Oliveira**. *Modelo de Gestão de Energia de um Veículo*. Guimarães : Universidade do Minho, 2007.
155. *dunlop.eu*. [Online]  
[http://www.dunlop.eu/dunlop\\_ptpt/what\\_sets\\_dunlop\\_apart/tyre\\_info/index.jsp?id=61418](http://www.dunlop.eu/dunlop_ptpt/what_sets_dunlop_apart/tyre_info/index.jsp?id=61418).
156. *The feasibility of long range battery electric cars in New Zealand*. **Duke, Mike, Deborah, Andrews e Anderson, Timothy**. s.l. : Elsevier, 2009.
157. *profafonso.com*. [Online]  
[http://www.profafonso.com/index.php?option=com\\_content&view=article&id=103:calculo-de-baterias&catid=20:principiosalt&Itemid=24](http://www.profafonso.com/index.php?option=com_content&view=article&id=103:calculo-de-baterias&catid=20:principiosalt&Itemid=24).
158. *unece.org*. [Online]  
<http://www.unece.org/fileadmin/DAM/trans/main/wp29/wp29regs/r101r2e.pdf>.
159. **Thomas , D. Gillespie**. *Fundamentals of Vehicle Dynamics*. s.l. : Society of Automotive Engineers, Inc.
160. **Rajamani, Rajesh**. *Vehicle Dynamics and Control*. USA : Springer, 2012.
161. *smithees-racetechnology.com.au*. [Online] <http://www.smithees-racetechnology.com.au/ackerman.html>.

162. **Arezes, Pedro M. , e outros.** *Estudo antropométrico da população Portuguesa*. Lisboa : ISHST, 2006.
163. **Fecheira, José Manuel Fernandes da Silva.** *Projecto de Veículo Eficiente para Homologação CE*. Guimarães : Universidade do Minho, 2011.
164. **Branco, Carlos Augusto Gomes de Moura.** *Mecânica dos materiais*. Lisboa : Fundação Calouste Gulbenkian, 1994.
165. [princeton.edu](http://www.princeton.edu/mae/people/faculty/soboyejo/research_group/research/mems/). [Online]  
[http://www.princeton.edu/mae/people/faculty/soboyejo/research\\_group/research/mems/](http://www.princeton.edu/mae/people/faculty/soboyejo/research_group/research/mems/).
166. [bosch-sensortec.com](http://www.bosch-sensortec.com/content/language1/html/4377.htm). [Online] <http://www.bosch-sensortec.com/content/language1/html/4377.htm>.
167. *ULSAB-AVC – PES Engineering Report*. 2001.
168. [curtisinstruments.com](http://curtisinstruments.com/index.cfm?fuseaction=cDataSheets.dspListDS&CatID=64). [Online]  
<http://curtisinstruments.com/index.cfm?fuseaction=cDataSheets.dspListDS&CatID=64>.
169. *catalogo.weg*. [Online] <http://catalogo.weg.com.br/files/wegnet/WEG-guia-de-especificacao-de-motores-eletricos-50032749-manual-portugues-br.pdf>.
170. *hitechcontrols.com*. [Online] <http://www.hitechcontrols.com/pdf-cable-techinfo/T63-Heat-resistance-class-VDE-0530-part-1.pdf>.
171. *irfanmal.wordpress*. [Online] <http://irfanmal.wordpress.com/>.
172. [sciencedirect.com](http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1352231007009041). [Online]  
<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1352231007009041>.
173. *sensorprod.com*. [Online] <http://www.sensorprod.com/index.php>.
174. *uk.ibtimes.com*. [Online] <http://uk.ibtimes.com/articles/20111012/minutes-less-another-charging-system-from-nissan.htm>.



175. *wheels.blogs.nytimes.com*. [Online] <http://wheels.blogs.nytimes.com/2011/03/03/solar-roadways-offer-a-possible-if-distant-remedy-for-e-v-range-anxiety/>.
176. *all-electronics.de*. [Online] <http://www.all-electronics.de/texte/anzeigen/42481/Deutsche-OEMs-setzen-Standards>.
177. *mpoweruk.com*. [Online] <http://www.mpoweruk.com/leadacid.htm>.
178. *nextgenlog.blogspot.com*. [Online] <http://nextgenlog.blogspot.com/2008/05/mems-vibration-sensor-debuts.html>.
179. *solarstik.com*. [Online] <http://www.solarstik.com/>.
180. *whatisnano.wordpress.com*. [Online] <http://whatisnano.wordpress.com/2011/04/07/nano-enhanced-ultracapacitors-for-energy-storage/>.
181. *www.greencar.com*. [Online] <http://www.greencar.com/articles/mdi-minicat-citicat-air-cars.php>.
182. *ec.europa.eu*. [Online] [http://ec.europa.eu/research/energy/pdf/key\\_messages\\_pt.pdf](http://ec.europa.eu/research/energy/pdf/key_messages_pt.pdf).
183. *sbpe.org.br*. [Online] <http://www.sbpe.org.br/socios/download.php?id=196..>
184. *pkcell1.en.made-in-china.com*. [Online] <http://pkcell1.en.made-in-china.com/product/jqMnkRAPbyVY/China-700mAh-Ni-CD-Battery-Pack-With-9-6V-Voltage.html>.
185. *bgdna.com*. [Online] <http://www.bgdna.com/energy-green-tech/sony-micro-fuel-cell.html>.
186. *techmagnews.com*. [Online] <http://www.techmagnews.com/tag/fuel>.
187. *eepe.murdoch.edu.au*. [Online] <http://www.eepe.murdoch.edu.au/resources/info/Applic/Fuelcells/index.html>.
188. *behrgroup.com*. [Online] [http://www.behrgroup.com/internet/behrrmm.nsf/lupgraphics/Li-ion%20battery%20cooling.doc/\\$file/Li-ion%20battery%20cooling.doc](http://www.behrgroup.com/internet/behrrmm.nsf/lupgraphics/Li-ion%20battery%20cooling.doc/$file/Li-ion%20battery%20cooling.doc).
189. *pofo.qren.pt*. [Online] <http://www.pofo.qren.pt/media/noticias/entity/mobiles-mobilidade-electrica-sustentada>.

190. *electrathonoftampabay.org*. [Online]  
[http://electrathonoftampabay.org/www/Documents/Motors/Brushless%20DC%20\(BLDC\)%20Motor%20Fundamentals.pdf](http://electrathonoftampabay.org/www/Documents/Motors/Brushless%20DC%20(BLDC)%20Motor%20Fundamentals.pdf).
191. *mercadoetico.terra.com.br*. [Online] <http://mercadoetico.terra.com.br/arquivo/producao-de-carro-indiano-movido-a-ar-comprimido-passa-para-segunda-fase/>.
192. *iea.org/papers*. [Online] [http://www.iea.org/papers/2011/EE\\_for\\_ElectricSystems.pdf](http://www.iea.org/papers/2011/EE_for_ElectricSystems.pdf).
193. *sciencedirect.com*. [Online]  
<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1361920905000039>.

## **BIBLIOGRAFIA**



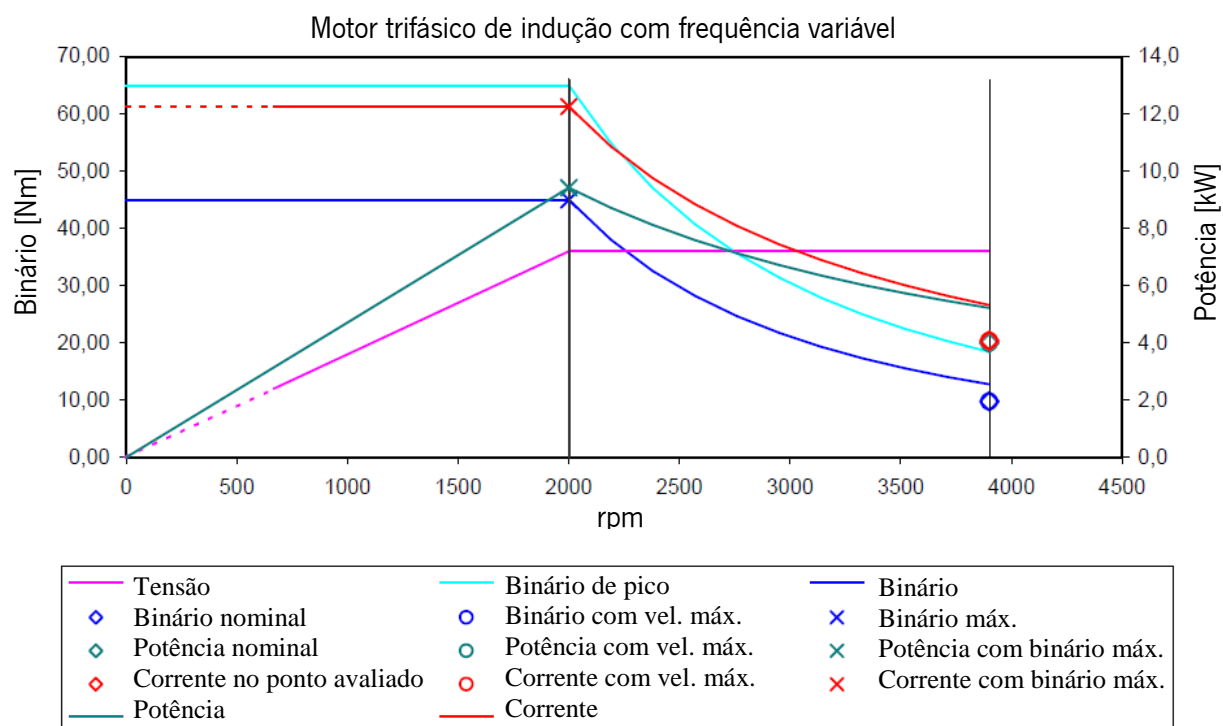
## Anexo A - Características típicas para alguns tipos de baterias

Specifications	Lead Acid	NiCd	NiMH	Li-ion		
				Cobalt	Manganese	Phosphate
<b>Specific energy density</b> (Wh/kg)	30–50	45–80	60–120	150–190	100–135	90–120
<b>Internal resistance</b> <sup>1</sup> (mΩ)	<100 12V pack	100–200 6V pack	200–300 6V pack	150–300 7.2V	25–75 <sup>2</sup> per cell	25–50 <sup>2</sup> per cell
<b>Cycle life</b> <sup>4</sup> (80% discharge)	200–300	1000 <sup>3</sup>	300–500 <sup>3</sup>	500–1,000	500–1,000	1,000–2,000
<b>Fast-charge time</b>	8–16h	1h typical	2–4h	2–4h	1h or less	1h or less
<b>Overcharge tolerance</b>	High	Moderate	Low	Low. Cannot tolerate trickle charge		
<b>Self-discharge/month</b> (room temp)	5%	20% <sup>5</sup>	30% <sup>5</sup>	<10% <sup>6</sup>		
<b>Cell voltage</b> (nominal)	2V	1.2V <sup>7</sup>	1.2V <sup>7</sup>	3.6V <sup>8</sup>	3.8V <sup>8</sup>	3.3V
<b>Charge cutoff voltage</b> (V/cell)	2.40 Float 2.25	Full charge detection by voltage signature		4.20		3.60
<b>Discharge cutoff voltage</b> (V/cell, 1C)	1.75	1.00		2.50 – 3.00		2.80
<b>Peak load current</b> Best result	5C <sup>9</sup> 0.2C	20C 1C	5C 0.5C	>3C <1C	>30C <10C	>30C <10C
<b>Charge temperature</b>	–20 to 50°C (–4 to 122°F)	0 to 45°C (32 to 113°F)		0 to 45°C <sup>10</sup> (32 to 113°F)		
<b>Discharge temperature</b>	–20 to 50°C (–4 to °F)	–20 to 65°C (–4 to 49°F)		–20 to 60°C (–4 to 140°F)		
<b>Maintenance requirement</b>	3–6 months <sup>11</sup> (topping chg.)	30–60 days (discharge)	60–90 days (discharge)	Not required		
<b>Safety requirements</b>	Thermally stable	Thermally stable, fuse protection common		Protection circuit mandatory <sup>12</sup>		
<b>In use since</b>	Late 1800s	1950	1990	1991	1996	1999
<b>Toxicity</b>	Very high	Very high	Low	Low		

Fonte: [http://batteryuniversity.com/learn/article/secondary\\_batteries](http://batteryuniversity.com/learn/article/secondary_batteries)



## Anexo B - Características do motor ABM de 4kW, do Little4



**Tipo de motor:** DG100Lc-4

**Polos:** 4

**E-Nr.:** E20373

**Tensão:** 28 V

**Nº do enrolamento:**

**Frequência:** 73 Hz

### Observações:

#### Máx. Binário

Velocidade: 2000 rpm

Fator de potência: 0,80

Frequência 73 Hz

Binário: 45,00 Nm

Rendimento 75,0 %

Deslizamento 6,3 Hz

Potência 9,42 kW

Modo de funcionamento: S2-5 min

Corrente 324,3 A

Tensão 28 V

#### Potência nominal

Velocidade 3900 rpm

Fator de potência: 0,90

Frequência [Hz]: 135

Binário 9,79 Nm

Rendimento 85,0 %

Deslizamento 5,0 Hz

Potência 4 kW

Regime de serviço: S2-60 min

Corrente 107,9 A

Tensão 28 V

#### Máx. Velocidade

Velocidade 3900 rpm

Fator de potência: 0,90

Frequência [Hz]: 135

Binário 9,79 Nm

Rendimento 85,0 %

Deslizamento 5,0 Hz

Potência 4 kW

Regime de serviço: S2-60 min

Corrente 107,9 A

Tensão 28 V

Nota do fabricante: corrente, escorregamento, fator de potência e eficiência são estimativos





## Anexo C - Código em MATLAB do mapa de rendimento do motor do Little4 (4kW)

```
% efic_motor
clc;
opcao=0;
while (opcao~=5)
    disp('+-+-----+');
    disp('| 1 - Inserir coef. perdas motor |');
    disp('| 3 - Consultar dados, correr programa e sair |');
    disp('+-+-----+');
    opcao=input('qual a escolha? ');

    switch opcao
        case 1 %Perdas do motor
            clc;
            kc=input('Inserir coef. perdas kc (1.645): ');
            ki=input('Inserir coef. perdas ki (0.432): ');
            kw=input('Inserir coef. perda fricção entre o rotor e o ar, kw (0.0000006218): ');
            C=input('Inserir coef. C (14.824): ');
            save coef_perdas_motor.mat;

            case 3 %Consultar dados, correr programa e sair
                clc;
                load coef_perdas_motor.mat;
                disp(' ')
                disp('      Dados do motor: ')
                disp(['Coef. perdas kc-----: ',num2str(kc)])
                disp(['Coef. perdas ki-----: ',num2str(ki)])
                disp(['Coef. kw-----: ',num2str(kw)])
                disp(['Coef. C-----: ',num2str(C)])
                break;
        end
    end
end

%-----Importar dados do Excel, rpm e binário de máximo(S2=5min)-----

tab_bin=xlsread('curva_motor.xlsx','binario_nom'); %%ler a folha
"binário_lido" do ficheiro excel "dados_matlab".
dados_rpm=tab_bin(:,1);%coluna da rpm
dados_bin=tab_bin(:,3);%coluna do binário

%nn = length(dados_rpm);
rpm_max=max(dados_rpm);
Tmax=max(dados_bin);

%-----inserção matriz e cálculos-----
n=50; %tamanho da malha
xx=linspace(1,rpm_max,n);% preencher vector xx
yy=linspace(1,Tmax,n); % preencher vector yy
[x,y]=meshgrid(xx,yy); %desenha uma matriz

%-----Limitar o gráfico ao binário lido-----
----
%-----interpolação de dados rotação-----
----
```

```

curva_bin=zeros(1,n);
for i=1:n
    curva_bin(i)= interp1(dados_rpm,dados_bin,xx(i)); %interpolação de
dados rotação(tab_bin(:,1), binário(tab_bin(:,2)
end
%-----Limitar o gráfico ao binário lido-----

for i=1:n
    for j=1:n
        if y(j,i) > curva_bin(i)
            y(j,i)=curva_bin(i);
        end
    end
end

%-----Importar dados do Excel, colocar traço do binário nominal no
gráfico-----

tab_bin_nom=xlsread('curva_motor.xlsx','binario_nom'); %ler a folha
"binário_nom" do ficheiro excel "dados_matlab".
dados_rpm_nom=tab_bin_nom(:,1);%coluna da rpm
dados_bin_nom=tab_bin_nom(:,2);%coluna do binário

%-----interpolação de dados rotação-----
-----
curva_bin_nom=zeros(1,n);
for i=1:n
    curva_bin_nom(i)= interp1(dados_rpm_nom,dados_bin_nom,xx(i));
%interpolação de dados rotação
end

%-----cálculos-----

Psaida=(x.*2*pi/60).*y; % Binário [rads=rpm*(2*pi/60)]; vexes a velocidade,
as operaçãoe scom matrizes(*,^,/,e) devem se precedidas por "."
T=y; % Binário é o eixo do y
w=x.*(2*pi/60); % Velocidade angular é o eixo do x

Pentrada = Psaida + kc*T.^2 + ki*w + kw*w.^3 + C; %As operaçãoe scom
matrizes(*,^,/,e) devem se precedidas por "."
z=Psaida./Pentrada ; %s operaçãoe scom matrizes(*,^,/,e) devem se precedidas
por "."
v=[0.2,0.3,0.4,0.5,0.6,0.65,0.7,0.725,0.75,0.775,0.8,0.825,0.85,0.875,0.90,
0.925]; %vecor da legenda da eficiencia

save ('rend_motor.mat','z');
%-----Guardar mapa de binário, rotação e rendimento-----

%save T.mat
%save w.mat
%save z.mat

%-----Curvas de nível (rendimento)-----
-

figure(1)

%contour(x,y,z,v,'LineWidth',4); % preenchimento de linhas das curvas de
nível

```

```

contourf(x,y,z,v,'w','LineWidth',0.1); % preenchimento sólido das curvas de
nível
%clabel(curvas) % mostra valores de nível em cada curva
%contourf(x,y,z,v); %preenchimento sólido das curvas de nível
colorbar % legenda do valor da cõr (eixo z)
xlabel('Velocidade (rpm)','FontSize',12), ylabel('Binário
(N.m)','FontSize',12);
title('Rendimento (%)','FontSize',12); %Título do gráfico

hold on
plot(xx,curva_bin,'-k','LineWidth',2); %Traço da curva limite de binário
lido a preto

hold on
plot(xx,curva_bin_nom,'--k','LineWidth',2); %Traço da curva de binário
nominal

%-----Curvas de rpotência-----

figure(2)

%contour(x,y,z,v); % preenchimento das linhas das curvas de nível
%clabel(curvas) % mostra valores de nível em cada curva
%contourf(x,y,z,v); %preenchimento sólido das curvas de nível
%colorbar % legenda do valor da cõr (eixo z)
xlabel('Velocidade (rpm)','FontSize',12), ylabel('Binário
(N.m)','FontSize',12);
title('Potência (kW)','FontSize',12); %Título do gráfico

hold on % sobrepor ao gráfico anterior
%P=[Pmotor,Pmotor];
[c,h]=contour(x,y,Psaída/1000);
colorbar % legenda do valor da cõr (eixo z)
clabel(c,h,'LabelSpacing',250,'FontSize',12,'Color','k') % mostra valores
de nível em cada curva

hold on
plot(xx,curva_bin,'-k','LineWidth',2); %Curva limite de binário a preto

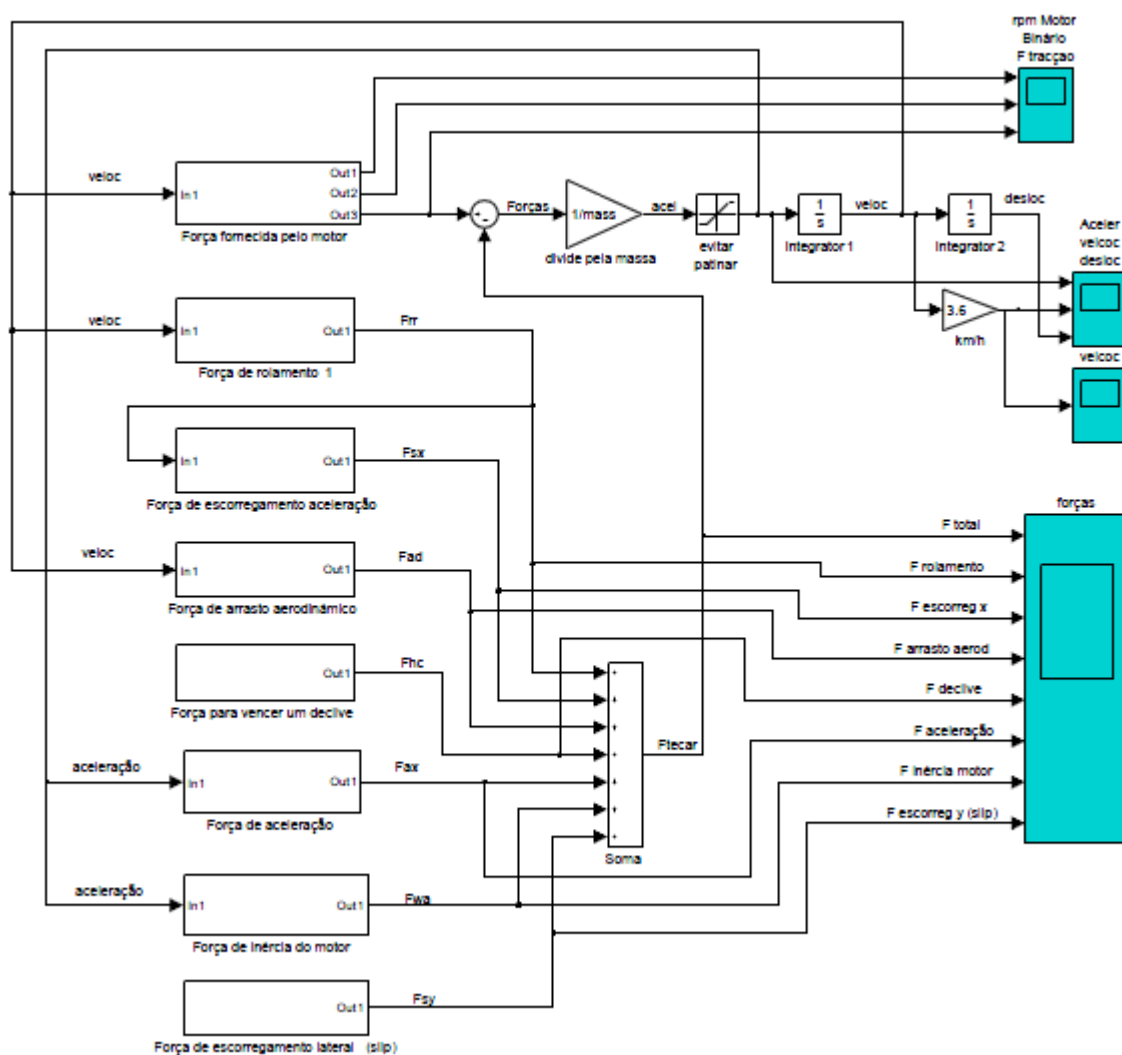
hold on
plot(xx,curva_bin_nom,'--k','LineWidth',2); %Traço da curva de binário
nominal

%-----

```



## Anexo D - Diagrama em MATLAB Simulink





## Anexo E - Dados do Little4, usados para *input* no MATLAB

---

### Dados do motor:

Limite de corrente (A) —: 230

Inércia do motor (kg/m<sup>2</sup>) —: 0.015

---

### Dados da bateria:

Tensão da bateria (V) —: 48

Capacidade de descarga (Ah) —: 230

Profundidade de descarga DoD (%) —: 80

---

### Rendimentos:

Rendimento do carregador —: 0.95

Rend. da bateria —: 0.75

Rendimento do controlador —: 0.95

Rendimento do motor —: 0.85

Rendimento da transmissão —: 0.98

---

### Dados carro:

Massa do carro + ocupantes (kg): 830

Coeficiente de arrasto (Cd) —: 0.45

Área frontal (m<sup>2</sup>) —: 1.85

Relação de transmissão —: 9.91

Pressão dos pneus (bar) —: 1.5

Raio exterior do pneu (m) —: 0.2731

---

### Outros dados:

Coef. de escorregamento  $\mu$  —: 0.15

Rigidez da curva —: 0

Densidade do ar (kg/m<sup>3</sup>) —: 1.25

Gravidade (m/s<sup>2</sup>) —: 9.81

---





## Anexo F - Código em MATLAB (consumo através do NEDC)

```
% menu_dados_carro
clc;
opcao=0;
while (opcao~=5)
    disp('+-+-----+');
    disp('| 1 - Dados do motor      |');
    disp('| 2 - Dados da bateria      |');
    disp('| 3 - Rendimentos          |');
    disp('| 4 - Dados do carro        |');
    disp('| 5 - Outros dados          |');
    disp('| 6 - Consultar dados      |');
    disp('| 7 - Sair                  |');
    disp('+-+-----+');
    opcao=input('qual a escolha? ');

    switch opcao
        case 1 %Dados do motor
            clc;
            lim_corr=input('Limite de corrente (A)? ');
            tensao=input('Tensão do motor (V)? ');
            fi=input('Coseno de fi do motor)? ');
            im=input('Inércia do rotor do motor(kg/m2)? ');
            save dados_consum.mat
        case 2 %Dados da bateria
            clc;
            bat_tens=input('Tensão da bateria (V)? ');
            bat_cap=input('Capacidade de descarga (Ah)? ');
            save dados_consum.mat
        case 3 %Dados dos rendimentos
            clc;
            rcarr=input('Rendimento do carregador? ');
            rbat=input('Rendimento da bateria? ');
            rcont=input('Rendimento do controlador? ');
            rmotor=input('Rendimento do motor? ');
            rtransm=input('Rendimento da transmissão? ');
            save dados_consum.mat
        case 4 %Dados do carro
            clc;
            mass=input('Massa do carro (kg)? ');
            cd=input('Coeficiente de arrasto (Cd)? ');
            aft=input('Área frontal (m2)? ');
            rtss=input('Relação de transmissão? ');
            pp=input('Pressão do pneu (bar)? ');
            rep=input('Raio exterior do pneu(m)? ');
            save dados_consum.mat
        case 5 %Outros dados
            clc;
            kx=input('Coeficiente de escorregamento x? ');
            rcr=input('Rigidez da curva? ');
            dar=input('Densidade do ar (kg/m3)? ');
            grav=input('Gravidade (m/s2)? ');
            save dados_consum.mat
        case 6 %Consultar dados
            load dados_consum.mat;
            clc;
            disp('_____')
            disp('          Dados do motor:          ')
            disp(['Limite de corrente (A)-----: ',num2str(lim_corr)])
            disp(['Inércia do motor (kg/m2)---: ',num2str(im)])
            disp(' ')
```

```

disp('')
disp('      Dados do bateria:')
disp(['Tensão da bateria (V)-----: ', num2str(bat_tens)])
disp(['Capacidade de descarga (Ah)---: ', num2str(bat_cap)])
disp(' ')
disp('')
disp('      Rendimentos:')
disp(['Rendimento do carregador-----: ', num2str(rcarr)])
disp(['Rend. da bateria -----: ', num2str(rbat)])
disp(['Rendimento do controlador-----: ', num2str(rcont)])
disp(['Rendimento do motor-----: ', num2str(rmotor)])
disp(['Rendimento da transmissão-----: ', num2str(rtransm)])
disp(' ')
disp('')
disp('      Dados carro:')
disp(['Massa do carro + ocupantes): ', num2str(mass)])
disp(['Coeficiente de arrasto(Cd) : ', num2str(cd)])
disp(['Área frontal (m2)-----: ', num2str(aft)])
disp(['Relação de transmissão-----: ', num2str(rtss)])
disp(['Pressão do pneu (bar)----: ', num2str(pp)])
disp(['Raio exterior do pneu(m)---: ', num2str(rep)])
disp('')
disp('      Outros dados:')
disp(['Coef. de escorregamento x--: ', num2str(kx)])
disp(['Rigidez da curva-----: ', num2str(rcr)])
disp(['Densidade do ar (kg/m3)----: ', num2str(dar)])
disp(['Gravidade (m/s2)-----: ', num2str(grav)])
break;
case 7 %Sair
    clc;
    break;
otherwise
    disp('Escolha nao valida');
end
end

%-----
%-----

% Cons_urb_rend
clc

kc=1.645;
ki=0.432;
kw=0.0000006218;
C=14.824;

load dados_consum.mat;
dados=xlsread('ciclo_europ.xlsx','NEDC','A2:H196'); %ler a folha "NEDC" do
ficheiro "ciclo_europ" de excel
tempo=dados(:,1);%coluna do tempo (s)
velx=dados(:,2);%coluna da velocidade x
acelx=dados(:,3);%coluna da aceleração x
acely=dados(:,4);%coluna da aceleração y
alt=dados(:,5);%coluna da altura h
angdec=dados(:,6);%coluna do ângulo de declive x
angslip=dados(:,7);%coluna do ângulo de escorregamento slip x
esp_perc=dados(:,8);%coluna do ângulo de escorregamento slip x

n=length(tempo); %guarda o comprimento do vector "tempo" na variável n.
urr=zeros(n,1);%preenche o vector com zeros até à posição n.

```

```

for i=1:n
    urr(i)=(0.8/1000)*(5.1+(5.5+9E-4*mass*grav)/pp+((0.011+3.88E-
7*mass*grav)/pp)*velx(i)^2);%coef de rolamento
end
Frr=zeros(n,1);%preenche o vector com zeros até à posição n.
for i=1:n
    Frr(i)=-urr(i)*mass*grav;%força de rolamento
end
Fsx=zeros(n,1);%preenche o vector com zeros até à posição n.
for i=1:n
    Fsx(i)=-kx*Frr(i)^2/(mass*grav);% força adicional de escorregamento x
    (slip)
end
Fad=zeros(n,1);%preenche o vector com zeros até à posição n.
for i=1:n
    Fad(i)=-0.5*dar*aft*cd*velx(i)^2;% força de arrasto aerodinâmico (slip)
end
Fhc=zeros(n,1);%preenche o vector com zeros até à posição n.
for i=1:n
    Fhc(i)=-mass*grav*sin(angdec(i)*pi/180);% força (+,-,) subida ou
    descida para vencer ângulo(°) de inclinação da subida
end
Fwa=zeros(n,1);%preenche o vector com zeros até à posição n.
for i=1:n
    Fwa(i)=-im*rtss^2*acelx(i)/(rtransm*rep^2);% força gasta na aceleração
    do motor
end
Fsy=zeros(n,1);%preenche o vector com zeros até à posição n.
for i=1:n
    Fsy(i)=-rcr*angslip(i)*mass*grav*sin(angslip(i)*pi/180);% força no
    slip, em curva
end
Fax=zeros(n,1);%preenche o vector com zeros até à posição n.
for i=1:n
    Fax(i)=-mass*acelx(i);% força (-mass)*(+acelx)=(-), se acelx=0, então
    Fax=0, na aceleração da massa do carro
end

%-----cálculos-----
----

Pmaxreg=3^(1/2)*tensao*lim_corr*cos(fi)/1000; %kW

PFrr=zeros(n,1);
PFsx=zeros(n,1);
PFad=zeros(n,1);
PFhc=zeros(n,1);
PFwa=zeros(n,1);
PFsy=zeros(n,1);
PFax=zeros(n,1);
Pinerc=zeros(n,1);
Parrast=zeros(n,1);
Pcar=zeros(n,1);
Preg=zeros(n,1);
for i=1:n
    PFrr(i)=Frr(i)*velx(i)/1000;
    PFsx(i)=Fsx(i)*velx(i)/1000;
    PFad(i)=Fad(i)*velx(i)/1000;
    PFhc(i)=Fhc(i)*velx(i)/1000;
    PFwa(i)=Fwa(i)*velx(i)/1000;
    PFsy(i)=Fsy(i)*velx(i)/1000;
    PFax(i)=Fax(i)*velx(i)/1000;

```

```

    Pinerc(i)=(Fwa(i)+Fax(i))*velx(i)/1000;
    Parrast(i)=(Frr(i)+Fsx(i)+Fad(i)+Fhc(i)+Fsy(i))*velx(i)/1000;
    Pcar(i)=-(Parrast(i)+Pinerc(i));
    if Pcar(i) <= 0
        Preg(i)=Pcar(i);% Potência (kW) da travagem em cada instante de
tempo
        Pcar(i) = 0;
    %         if Preg(i)> Pmaxreg % A regeneração está limitada à P máx (w), que
o motor e baterias podem absorver
    %             Preg(i)=Pmaxreg; % para ficar em (W).
    %         end
    end
end
end

%-----Consumo de energia (motora)-----
-----

Ecar=zeros(n,1); %preenche o vector com zeros até à posição n.
rend_tom_roda=zeros(n,1);
rend_bat_roda=zeros(n,1);
rend_regen=zeros(n,1);
rmot=ones(n,1);
Pentrada=zeros(n,1);
Psaida=zeros(n,1);
T=zeros(n,1);
w=zeros(n,1);
Etcар=0;%Reset ao valor inicial
for i=2:n
    Psaida(i)=Pcar(i)*1000;
    w(i)=velx(i)*rtss/rep;%para radianos
    T(i)=Pcar(i)*1000/w(i);
    if Pcar(i) > 0
        Pentrada(i)=Psaida(i)+ kc*T(i).^2 + ki*w(i) + kw*w(i).^3 + C;
        rmot(i)=Psaida(i)/Pentrada(i);
    end
    Ecar(i)=Pcar(i)*(tempo(i)-tempo(i-1))/3600;% energia (kWh) gasta em
cada instante de tempo
    rend_tom_roda(i)=rcarr*rbat*rcont*rmot(i)*rtransm;%rendimento de
descarga da bateria
    Ecar(i)=Ecar(i)/rend_tom_roda(i);
    rend_bat_roda(i)=rbat*rcont*rmot(i)*rtransm; %rendimento de descarga da
bateria
    rend_regen(i)=rtransm*rmot(i)*rcont; %rendimento de carga da bateria
por trav. regen.
    Etcар=Etcар+Ecar(i);%energia somada até esse tempo, ou seja: para tempo
total energia total
end
%-----Energia recuperada na ravagem regenerativa-----
-----

Ereg=zeros(n,1);%%preenche o vector com zeros até à posição n.
Etregen=0;%Reset ao calor inicial

for i=2:n
    Ereg(i)=Preg(i)*(tempo(i)-tempo(i-1))/3600; % energia (kWh) gasta em
cada instante de tempo
    Ereg(i)=Ereg(i)*rend_regen(i)*rend_bat_roda(i);
    Etregen=Etregen+Ereg(i);%energia (W) somada até esse tempo, ou seja:
para tempo total energia total
end

```

```

%-----Balanço de energia (gasta-recuperada) e consumo -----
---

Etotal=(Etcara+Etrege); %(+)+(-)=+, Energia (kW) total gasta, afectada
pelos rendimentos
total_esp_perc = (max(esp_perc)-min(esp_perc));
consumo=Etotal*100/(total_esp_perc*0.001);
percent_regen=abs(Etrege/Etcara);
Ebat=bat_tens*bat_cap*(DoD/100)/1000; %em kWh
autonomia=Ebat*100/consumo;

%disp(['Rendimento (tomada->roda): ',num2str(rend_tom_roda*100),'%'])%
energia (kWh) gasta no total do percurso
%disp(['Rendimento (bateria->roda): ',num2str(rend_bat_roda*100),'%'])%
energia (kWh) gasta no total do percurso
%disp(['Rendimento da regeneração: ',num2str(rend_regen*100),'%'])% energia
(kWh) gasta no total do percurso
disp(['Consumo: ',num2str(consumo),'kWh/100km'])% energia (kWh) gasta no
total do percurso
disp(['Percentagem de regeneração: ',num2str(percent_regen*100),'%'])%
energia (kWh) gasta no total do percurso
disp(['Autonomia: ',num2str(autonomia),'km'])% energia (kWh) gasta no total
do percurso
%-----Gráfico 1 -----
--
figure (1)

plot(tempo,Pcara,'-r','LineWidth',1);% Desenha o grafico em função do tempo
e da energia gasta em cada instante
hold on;% Mantem o gráfico para a sobreposição.
plot(tempo,Preg,'-c','LineWidth',1);% Desenha o grafico em função do tempo
e da energia gasta em cada instante
%hold on;% Mantem o gráfico para a sobreposição.
%plot(tempo,Parrast+Pinerc,'-g','LineWidth',1);% Desenha o grafico em
função do tempo e da energia gasta em cada instante
hold on;% Mantem o gráfico para a sobreposição.
plot(tempo,rmot*5,'-g');% Desenha o grafico em função do tempo e do
rendimento
hold on;% Mantem o gráfico para a sobreposição.
plot(tempo,velx*3.6/(4),'-k','LineWidth',2);% Desenha o grafico em função
do tempo e da energia gasta em cada instante

hold on;% Mantem o gráfico para a sobreposição.
eixox=zeros(n,1);%preenche o vector com zeros até à posição n.;% Apenas
para ter linha de eixo x
plot(tempo,eixox,'-k');% Desenha o grafico em função do tempo e da energia
gasta em cada instante a (verde).

title('Ciclo europeu NEDC','FontSize',11)
ylabel('Potencia (kW)','FontSize',11)
xlabel('Tempo (s)','FontSize',11)
legend('Potência motora (vermelho)','Potência regenerativa
(azul)','Rendimento (verde)','Ciclo NEDC (preto)')

%-----Gráfico 2 -----
--
figure (2)

plot(tempo,Pinerc,'-m');% Desenha o grafico em função do tempo e da energia
gasta em cada instante
hold on;% Mantem o gráfico para a sobreposição.

```

```

plot(tempo,PFrr,'-b');% Desenha o grafico em função do tempo e da energia
gasta em cada instante
%hold on;% Mantem o gráfico para a sobreposição.
%plot(tempo,PFsx,'-y');% Desenha o grafico em função do tempo e da energia
gasta em cada instante
hold on;% Mantem o gráfico para a sobreposição.
plot(tempo,PFad,'-g');% Desenha o grafico em função do tempo e da energia
gasta em cada instante
%hold on;% Mantem o gráfico para a sobreposição.
%plot(tempo,PFhc,'-k','LineWidth',2);% Desenha o grafico em função do tempo
e da energia gasta em cada instante
%hold on;% Mantem o gráfico para a sobreposição.
%plot(tempo,PFsy,'-k','LineWidth',2);% Desenha o grafico em função do tempo
e da energia gasta em cada instante
hold on;% Mantem o gráfico para a sobreposição.
plot(tempo,velx*3.6/(10),'-k','LineWidth',2);% Desenha o grafico em função
do tempo e da energia gasta em cada instante

hold on;% Mantem o gráfico para a sobreposição.
eixox=zeros(n,1);%preenche o vector com zeros até à posição n.;% Apenas
para ter linha de eixo x
plot(tempo,eixox,'-k');% Desenha o grafico em função do tempo e da energia
gasta em cada instante a (verde).

title('Ciclo de condução','FontSize',11)
ylabel('Potencia (kW)','FontSize',11)
xlabel('Tempo (s)','FontSize',11)
legend('Potênci inercial (magenta)','Potência de rolamento
(azul)','Potência de arrasto (verde)'...
, 'Ciclo NEDC (preto)')
%-----

```

## Anexo G - Parâmetros do controlador

<b>TECH STUDIO</b>			<b>THROTTLE MENU</b>			<b>MOTOR MENU</b>		
Speed Modes			Throttle Type			Typical Max Speed	rpm	
Boost Mode			Forward Deadband			Swap Encoder Direction	on/off	
Current Limit	%		Forward Map			Swap Two Phases	on/off	
Forward Speed	rpm		Forward Max			Encoder Steps		
Reverse Speed	rpm		Forward Offset			Encoder Fault Step		
Cruise Mode			Reverse Deadband			Fault Detectio	on/off	
Current Limit	%		Reverse Map			Fault Stall Time	s	
Forward Speed	rpm		Reverse Max			LOS Upon Encode	on/off	
Reverse Speed	rpm		Reverse Offset			LOS Máx Speed	rpm	
Slow Mode			Throttle Filter			LOS Máx Current	A	
Current Limit	%		HPD/SRO Enable			LOS Mode De...	%	
Forward Speed	rpm		Sequencing Delay			LOS AceI Rate	s	
Reverse Speed	rpm		VCL Throttle Enable			LOS Decel Rate	s	
<b>CONTROL MODE SELECT</b>			<b>BRAKE MENU</b>			<b>Temperature Control</b>		
<b>SPEED MODE EXPRESS</b>			Brake Pedal Enable			Sensor Enable	on/off	
Max Speed	rpm		Brake Type			Sensor Type		
Kp	%		Brake Deadband			Sensor Temp Offset	°C	
Ki	%		Brake Map			Temperature Hot	°C	
Accel Rate	s		Brake Max			Temperature Max	°C	
Decel Rate	s		Brake Offset			Current Source		
Brake Rate	s		Brake Filter			Motor Temp LOS Max Speed	rpm	
<b>RESTRAINT MENU</b>			VCL Brake Enable			<b>BATTERY MENU</b>		
Restraint Forward	%		<b>DRIVERS MENU</b>			Nominal Voltage	V	
Restraint Back	%		Main Contactor			Undervoltage Cutback Range	V	
Soft stop speed	rpm		Main Enable			User Overvoltage	%	
Position Hold			Pull In Voltage			User Undervoltage	%	
Position Hold Enable	on/off		Holding Voltage			Reset Volts Per Cell	V	
Kp	%		Battery Voltage Comp			Full Volts Per Cell	V	
Kp Deadband (Motor Deg)	(°)		Interlock Type			Empty Volts Per Cell	V	
Kd	%		Open Delay			Discharge Time	min	
Set Speed Threshold	rpm		Checks Enable			BDI Reset Percent	%	
Entry Rate	%		Main DNC Threshold			<b>VEHICLE MENU</b>		
Exit Rollback Reduction	%		Precharge Enable			Metric Units	on/off	
<b>CURRENT LIMITS MENU</b>			Proportional Driver			Speed to RPM	rpm	
Drive Current Limit	%		PD Enable			Capture Speed	rpm	
Regen Current Limit	%		Hyd Lower Enable			Capture Distance 1		
EMR Current Limit	%		PD Max Current			Capture Distance 2		
Brake Current Limit	%		PD Min Current			Capture Distance 3		
Interlock Brake Current Limit	%		PD Dither %			<b>INTERLOCK BRAKING MENU</b>		
Power Limiting Map			PD Dither Period			Enable	on/off	
Base Speed	rpm		PD Kp			Decel Rate HS	s	
Delta Speed	rpm		PD Ki			Decel Rate LS	s	
Drive Limiting Map			Hydraulic Contactor			Interlock Brake Timeout	s	
Nominal	%		Contactor Enable			<b>MOTOR CONTROL TUNING MENU</b>		
Base Plus Delta	%		Pull In Voltage			Motor Charact. Tests		
Base Plus 2xDelta	%		Holding Voltage			Test Enable		
Base Plus 4xDelta	%		Fault Checking			Test Throttle		
Base Plus 8xDelta	%		Driver1 Checks Enable			Motor Poles		
Regen Limiting Map			Driver2 Checks Enable			Máx Test Speed	rpm	
Nominal	%		Driver3 Checks Enable			Máx Test Current	%	
Base Plus Delta	%		Driver4 Checks Enable			Slip Gain	%	
Base Plus 2xDelta	%		PD Checks Enable			Field Weakening Control		
Base Plus 4xDelta	%		External Supply Max			Base Speed	rpm	
Base Plus 8xDelta	%		External Supply Min			Field Weakening	%	
			PWM Freq.			Weakening Rate	%	
						Min Field Current	A	
						Motor Type		
						Reset Controller		





## Anexo H - Consumo verificado em testes reais

	Bateria		Energia fornecida p/ carreg. bat.	Consumo
km	BDI (%)	Tens. Ab. (V)	kWh	(kWh/100km)
0	100	56		
16,2	97	51,9		
21,2	98	51,5		
28,2	88	50,7		
37,2	75	50		
60,2	28	47,6		
64,2	14	46,4	9,04	14,08

0	100	53,3		
5	94	52,6		
21	97	51,3		
34	77	50,4		
54,5	36	48,6		
70	1	45,7	8,2	11,71

0	100	53,4		
7,5	94	52,6		
20	87	51,8		
35,5	83	50,6		
55,4	50	49,2		
83	3		6,14	7,40

0	100	53,2		
23,6	93	51,2		
43,6	62	49,4		
59,1	40	48,3		
64,6	29	48	7	10,84

0	100	54,5		
12,5	85	51,7		
52	45	48,4		
70	0	45,5	6,8	9,71

Total

351,8

Km

Auton. med:

70,4

km

Cons. med:

10,7

(kWh/100km)